

# 溶接および加工

## 概要

HAYNES® および HASTELLOY® 合金は、2つの主要なカテゴリーに分類されます:

**耐食合金(CRA)**は、一般に1000°F(538°C)以下の温度で使用され、腐食性液体に耐えることができます。

**耐熱合金(HTA)**は、一般に1000°F(538°C)以上の温度で使用され、その温度において、高温空気および/あるいは他の高温ガスに対してかなりの強度と耐性を有しています。

耐熱合金は、強度を与えるために使用されるメカニズムによってサブカテゴリに分類することもできます。多くの合金は、かなりの量の原子的に大きな元素を含んでいます; これらは、固溶強化として知られているメカニズムによって合金に強度を付与します。他のHTA材料は、要求される強度レベルを達成するために、時効硬化として知られる(析出硬化としても知られている)メカニズムを使用します。時効硬化型の耐食合金もあります。

時効硬化型の材料を強化するために必要な熱処理は、通常、溶接および熱間/冷間加工の後に行われ、合金がアニーリングされた状態で供給される限り、これらの熱処理の前に固溶強化型合金に適用される製造技術/パラメータには多くの共通点があります。

ステンレス鋼および他の合金系と同様に、溶接の熱、熱間加工に伴う高温、あるいは冷間加工後のアニーリングの影響に曝された場合、HAYNES®とHASTELLOY®合金に生じるかもしれない冶金学的変化を基本的に理解していることは有益です。ロウ付けを試みる場合、ロウ付けに伴う温度がHAYNES®およびHASTELLOY®材にどのような影響を及ぼすのか、あるいは逆に、それに続く時効硬化(時効硬化型合金の場合)またはアニーリング処理(いかなる合金の場合でも)がロウ付け接合部にどのような影響を及ぼすのかを理解することは非常に重要です。

Haynes Internationalによって製造される汎用合金に加えて、異なる製造方法を必要とする、いくつかの特殊用途の合金があります。一つは管状形態のみで製造されるチタン合金で、そのための製造基準があります。一つは、材料に強度を付与するために窒素拡散処理を必要とする高温ニッケル基合金で、それに対しては特定の製造上の問題があります。他の二つはコバルト基の耐摩耗合金で、その一つは、通常では溶接も成形もできません; もう一方は、容易に溶接できますが、加工硬化速度が速いために冷間加工に対してはやや抵抗があります。

# 概要

## Haynes International 合金

主成分	耐食合金 (CRA)	
	固溶強化型	時効硬化型
ニッケル	B-3 <sup>®</sup> C-4, C-22 <sup>®</sup> , C-276, C-2000 <sup>®</sup> G-30 <sup>®</sup> , G-35 <sup>®</sup> HYBRID-BC1 <sup>®</sup>	C-22HS <sup>®</sup>

主成分	耐熱合金 (HTA)	
	固溶強化型	時効硬化型
ニッケル	N, S, W, X 75 214 <sup>®</sup> , 230 <sup>®</sup> 617 <sup>®</sup> , 625, 625SQ <sup>®</sup> HR-120 <sup>®</sup> , HR-160 <sup>®</sup> , HR-224 <sup>®</sup> , HR-235 <sup>™</sup>	242 <sup>®</sup> , 244 <sup>™</sup> , 263, 282 <sup>®</sup> 718 R-41 Waspaloy X-750
コバルト	25, 188	-
鉄	556 <sup>®</sup> , MULTIMET <sup>®</sup>	-

主成分	軽量合金 (LA)	
	時効硬化型	
チタン	Ti-3Al-2.5V	

主成分	耐熱合金 (HTA-NS)	
	窒素強化型	
コバルト	NS-163 <sup>®</sup>	

主成分	耐摩耗合金 (WRA)	
コバルト	6B	

主成分	耐摩耗・耐食合金	
コバルト	ULTIMET <sup>®</sup>	

# 熱間加工

HAYNES® および HASTELLOY® 合金は、熱間加工で様々な形状にできます;しかしながら、熱間加工量および加工率に対しては、オーステナイトステンレス鋼よりも敏感です。加えて、HAYNES® および HASTELLOY® 合金に対する熱間加工温度範囲は極めて狭く、熱間加工パラメータに対して細心の注意が必要です。

適切な熱間加工法の開発においては、問題となる合金の固相線(合金が溶融し始める温度)、高温におけるHAYNES® および HASTELLOY® 合金の高い強度、高加工硬化速度、および低熱伝導率に特に注意を払う必要があります。さらに、温度が熱間加工範囲の下限に向かって低下するに従って、変形に対する抵抗が著しく増加します。

したがって、頻繁な再加熱と相まって、高い(重度の)初期加工率、およびそれに続く適度な仕上げ加工率を組み込んだ熱間加工の実践が一般に最良の結果をもたらします。加えて、変形速度が遅いことは、断熱加熱および適用される所要荷重を最小にする傾向があります。

**\*熱間加工の後に、HAYNES®およびHASTELLOY®合金は、使用、時効硬化(時効硬化型合金の場合)、または更なる加工に対して最適な条件に戻すためにアニールする必要があります。アニール温度およびテクニックは、熱処理の項に詳述されています。**

# 熱間加工(続き)

## 溶融温度範囲

合金	溶融温度範囲			
	固相線*		液相線**	
	°F	°C	°F	°C
<b>B-3<sup>®</sup></b>	2500	1370	2585	1418
<b>C-4</b>	-		-	
<b>C-22<sup>®</sup></b>	2475	1357	2550	1399
<b>C-22HS<sup>®</sup></b>	2380	1304	2495	1368
<b>C-276</b>	2415	1323	2500	1371
<b>C-2000<sup>®</sup></b>	2422	328	2476	1358
<b>G-30<sup>®</sup></b>	-		-	
<b>G-35<sup>®</sup></b>	2430	1332	2482	1361
<b>HYBRID-BC1<sup>®</sup></b>	2448	1342	2509	1376
<b>N</b>	2375	1302	2550	1399
<b>ULTIMET<sup>®</sup></b>	2430	1332	2470	1354
<b>25</b>	2425	1329	2570	1410
<b>75</b>	2445	1341	2515	1379
<b>188</b>	2400	1316	2570	1410
<b>214<sup>®</sup></b>	2475	1357	2550	1399
<b>230<sup>®</sup></b>	2375	1302	2500	1371
<b>242<sup>®</sup></b>	2350	1288	2510	1377
<b>244<sup>TM</sup></b>	2480	1360	2550	1399
<b>263</b>	2370	1299	2470	1354
<b>282<sup>®</sup></b>	2370	1299	2510	1377
<b>556<sup>®</sup></b>	2425	1329	2480	1360
<b>617</b>	2430	1332	2510	1377
<b>625</b>	2350	1288	2460	1349
<b>625SQ<sup>®</sup></b>	2350	1288	2460	1349
<b>718</b>	2300	1260	2435	1335
<b>HR-120<sup>®</sup></b>	2478	1359	2542	1395
<b>HR-160<sup>®</sup></b>	2360	1293	2500	1371
<b>HR-224<sup>®</sup></b>	2449	1343	2510	1377
<b>HR-235<sup>TM</sup></b>	2401	1316	2473	1356
<b>MULTIMET<sup>®</sup></b>	2350	1288	2470	1354
<b>R-41</b>	2385	1307	2450	1343
<b>S</b>	2435	1335	2516	1380
<b>W</b>	2350	1288	2510	1377
<b>WASPALLOY</b>	2425	132	2475	1357
<b>X</b>	2300	1260	2470	1354
<b>X-750</b>	2540	1393	2600	1427

\*合金が溶け始める温度

\*\*合金が完全に溶ける温度

# 熱間加工(続き)

## 鍛造

下記の合金に適用できる推奨手順と温度:

耐食合金

耐熱合金

耐摩耗・耐食合金

以下は、HAYNES® および HASTELLOY® 合金の鍛造に対する推奨手順です:

- ・ 厚さ1インチあたり少なくとも30分間、ビレットまたはインゴットを鍛造開始温度に浸す。校正された光学的放射温度計の使用が不可欠である。
- ・ 鋼材は、均等に加熱されるように頻繁にひっくり返すこと。合金に火炎が直接当たることは避けること。
- ・ 炉から取り出した後、直ちに鍛造を始めること。短時間の経過で、表面温度が100–200°F (55–110°C)程度低下する可能性がある。粒界の一部が熔融するおそれがあるため、熱損失を補償するために鍛造温度を上げないこと。
- ・ 可能な限り多くの内部熱を保持し、それによって結晶粒の粗大化および再加熱の回数を最小限に抑えるため、中程度の断面減少率(25~40%)にすること。1回のパスあたり40%を超える断面減少率は避けること。
- ・ 最終部品において適切な組織と特性が得られるように、鍛造中に十分な熱間加工を施すように注意すること。断面積が大きい部品に対しては、適切な鍛造断面減少率を可能にするために、鍛造の据え込み回数を多くした熱間加工スケジュールを推奨する。一般に許容される据え込み比率:L/Dは、3:1である。
- ・ 軽度の断面減少率によるサイズ仕上げ工程は、一般的に避けること。必要であれば、鍛造温度範囲の下限で行うこと。
- ・ 最初の成形段階では、正方形から円形に直接成形するような急激な断面形状の変化はさせないこと。代わりに、正方形から”角を丸くした正方形”、次いで八角形、次に円形となるように成形すること。
- ・ 鍛造中に発生した割れや裂け目は、(条件を設けて)除去すること。除去は、鍛造工程間の中間段階で行うことができる。

# 熱間加工(続き)

## 鍛造/熱間加工の温度範囲

合金	鍛造/熱間加工温度			
	開始温度*		仕上げ温度**	
	°F	°C	°F	°C
B-3®	2275	1246	1750	954
C-4	2200	1204	1750	954
C-22®	2250	1232	1750	954
C-22HS®	2250	1232	1750	954
C-276	2250	1232	1750	954
C-2000®	2250	1232	1750	954
G-30®	2200	1204	1800	982
G-35®	2200	1204	1750	954
HYBRID-BC1®	2250	1232	-	-
N	2200	1204	1750	954
ULTIMET®	2200	1204	1750	954
25	2200	1204	1750	954
75	2200	1204	1700	927
188	2150	1177	1700	927
214®	2150	1177	1800	982
230®	2200	1204	1700	927
242®	2125	1163	1750	954
244™	-	-	-	-
263	2150	1177	1750	954
282®	2125	1163	1850	1010
556®	2150	1177	1750	954
617	2125	1163	1600	871
625	2150	1177	1600	871
625SQ®	-	-	-	-
718	2050	1121	1650	899
HR-120®	2150	1177	1700	927
HR-160®	2050	1121	1600	871
HR-224®	-	-	-	-
HR-235™	2250	1232	1750	954
MULTIMET®	2150	1177	1700	927
R-41	2150	1177	1850	1010
S	2100	1149	1700	927
W	2240	1227	1800	982
WASPALOY	2150	1177	1850	1010
X	2100	1149	1750	954
X-750	2150	1177	1750	954

\*最大値

\*\*加工の性質と程度に依存する。

# 熱間加工(続き)

## 熱間圧延

下記の合金に適用できる推奨手順と温度:

耐食合金  
耐熱合金  
耐摩耗・耐食合金

HAYNES® および HASTELLOY® 合金は、熱間圧延によって、棒、リング、および平板のような従来の圧延形態にすることができます。熱間圧延の温度範囲は、前記(鍛造の項に記載した鍛造/熱間加工温度範囲)と同じです。

中程度の1パス当たりの断面減少率(15~20%の面積減少)、および200~300SFPM(フィート/分)の圧延速度は、ミルに過負荷をかけることなく良好な結果をもたらす傾向があります。工程当たりの総断面減少率は、少なくとも20~30%にする必要があります。熱間加工温度範囲の下限で仕上げるのが一般的で、これによって、一般的に最適な組織および特性が付与されます。

圧延前に、加工物が熱間加工開始温度で完全に浸漬されるように注意する必要があります。熱間圧延の間、加工物の温度を熱間加工温度範囲内に保つために、頻繁な再加熱が必要とされることがあります。

## 熱間成形

下記の合金に適用できる推奨手順と温

度: 耐食合金  
耐熱合金  
耐摩耗・耐食合金

厚板を皿形鏡板のような部品に成形する場合、通常は中間アニールを伴う冷間プレスまたはスピニング成形が適用されます。しかしながら、材料のサイズおよび厚さによっては、熱間成形が必要な場合があります。

熱間成形が必要な場合、(炉が加熱される)開始温度は、(対象となる合金の)アニーリング温度と(仕上げ)鍛造の下限温度とのほぼ中間です。熱間成形の間、加工物の温度は(仕上げ)鍛造温度の下限を下回ってはなりません。正確な熱間成形温度を維持するために再加熱が必要な場合があり、表面が過度に冷却されないように金型を温める必要がありません。

## その他の熱間加工プロセス

下記の合金に適用できる推奨手順と温

度: 耐食合金  
耐熱合金  
耐摩耗・耐食合金

HAYNES® および HASTELLOY® 合金は、熱間押出成形および熱間スピニング成形のような、いくつかの他の熱間加工プロセスに適しています。衝撃押出成形は、加工する合金の溶体化処理温度で行わなければなりません。衝撃押出成形中は、加工物全体にわたって均一で正確な温度であることが必要であり、打ち直しは避けなければなりません。熱間押出成形および熱間スピニング成形に対するパラメータは、意図する作業および材料の正確な性質に固有のものであります。詳細については、技術支援チームにお問い合わせください。

# 冷間加工

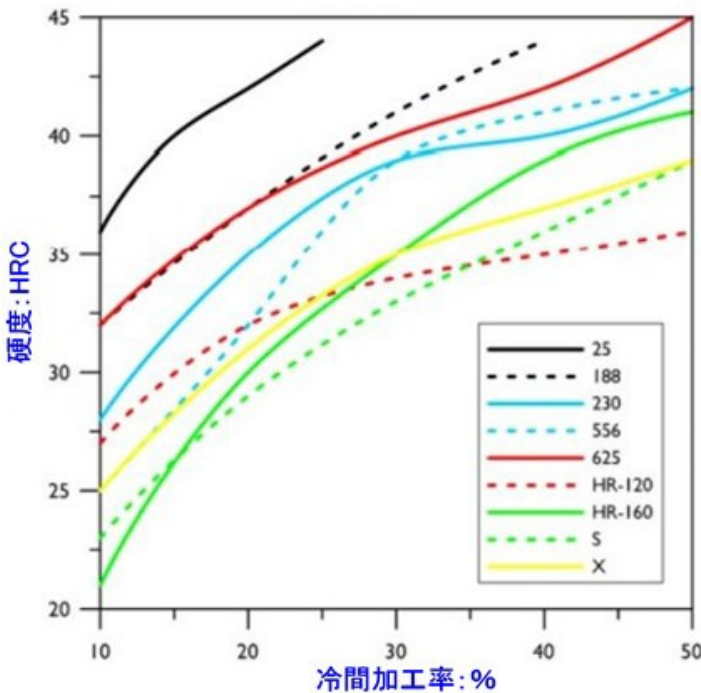
HAYNES® および HASTELLOY® 合金は、冷間加工によって様々な形状に容易に成形することができます。これらの合金は、オーステナイト系ステンレス鋼よりも一般的に強度があり、より急速に硬化するため、同量の冷間変形を達成するためには、より大きな荷重が通常必要とされます。HAYNES® および HASTELLOY® 合金のより高い降伏強さは、オーステナイト系ステンレス鋼と比較して、冷間成形後に大きなスプリングバックを生じる可能性があります。さらに、急速な加工硬化は、最終形状を達成するために成形ステップ間においてより頻繁なアニーリング処理を必要とするかも知れません。HAYNES® および HASTELLOY® 合金の硬度、降伏強さ、および延性に及ぼす冷間加工の影響を以下のグラフに示します。

下記の合金に適用できる硬度に対する冷間加工の影響:

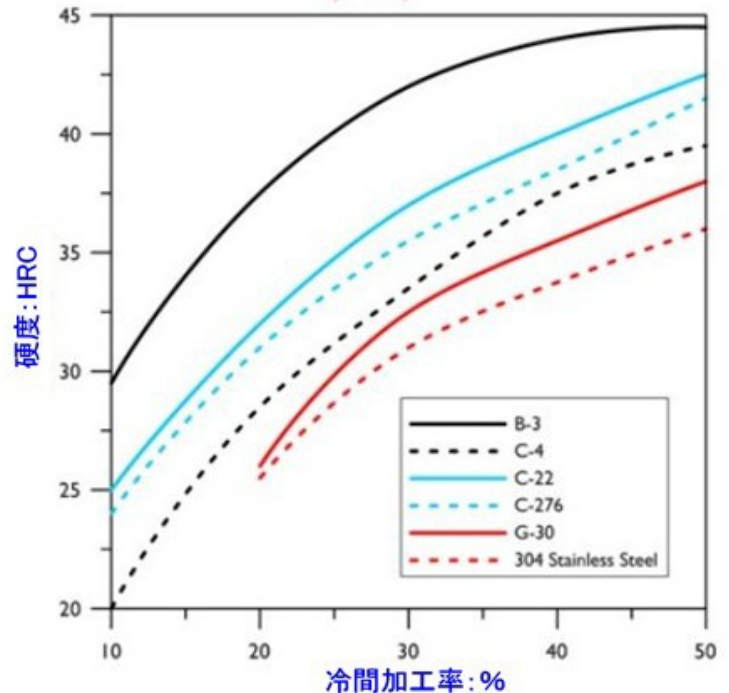
耐食合金

耐熱合金

冷間加工後の硬度 (HTA)



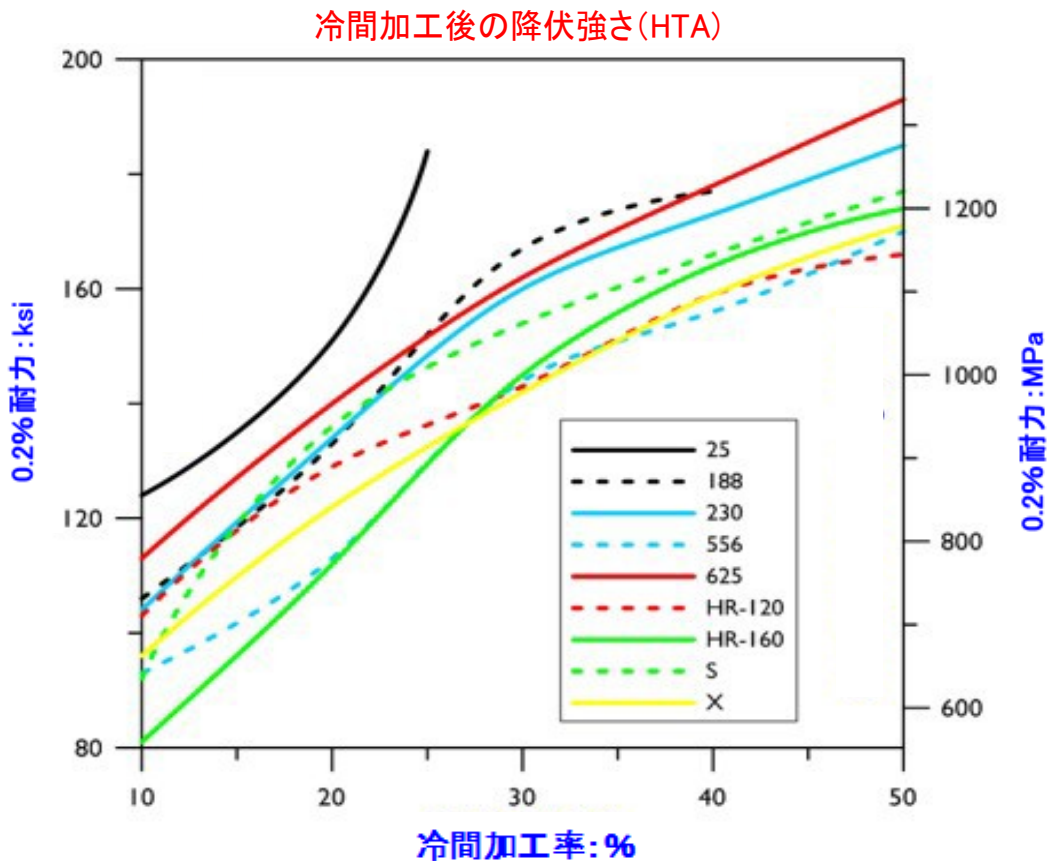
冷間加工後の硬度 (GRA)



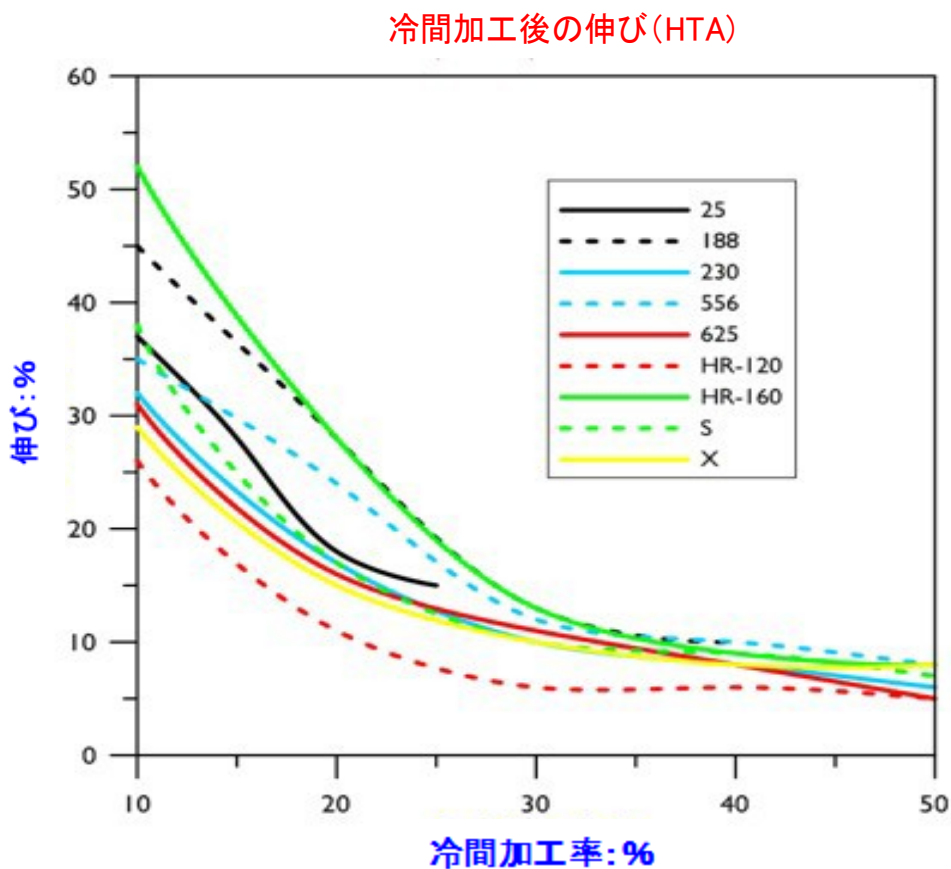


# 冷間加工(続き)

降伏強さに対する冷間加工の影響:  
耐熱合金



下記の合金に適用できる伸びに対する冷間加工の影響:  
耐熱合金



## 冷間加工(続き)

一般に、供給された状態の材料(Haynes International の工場でのアニール済み)は、軽度の成形に対して十分な延性を有しています。しかしながら、延性の低下による亀裂発生の可能性がある高レベルの冷間成形に対しては、各々の成形作業を中間アニーリング処理を施した後に行う、一連の連続的な成形工程を推奨します。ほとんどの状況下では、中間アニーリング処理は溶体化処理でなければなりません(処理温度は熱処理の項に記載されています)。このような連続的な成形/アニーリング作業を完了した後に、材料を最適な状態および特性に戻すために、仕上げ(溶体化)アニールを行うことを推奨します。この処理は、耐食合金の場合において、応力腐食割れに対する耐性を回復させるために特に重要です。

**しかしながら、低レベルの冷間加工(おおよそ7~10%以下の外繊維伸び)を施した材料のアニーリングは、異常な結晶粒成長を引き起こし、“オレンジピール(あばた)”あるいは“ワニ皮”として知られている表面状態にし、特性に著しく影響するため、一般には推奨できません。更なるガイダンスが必要な場合は、特定の合金に対する追加の‘加工および溶接’に関する情報を参照していただくか、Haynes International までご連絡ください。**

以下に議論するように、合金への有害元素の拡散を防ぐために、中間(あるいは仕上げ)アニーリング処理の前に、いかなる場合でも加工物の表面から、あらゆる潤滑剤、またはその他の異物を注意深く除去することが非常に重要です。

中間アニーリング処理によって生じたあらゆるスケール(すなわち、表面薄膜)は、次の成形作業の前に、酸洗または機械的手段によって除去することを強く推奨します。

HAYNES® および HASTELLOY® 合金の冷間加工を成功させるためには、潤滑が重要な考慮点です。通常、単純な曲げ加工には潤滑は必要ではありませんが、冷間引抜きなどの他の成形作業には潤滑剤の使用が不可欠です。軽度の成形作業は、容易に除去できるラード油またはヒマシ油を用いて、首尾良く完了させることができます。より厳しい成形作業には、金属石鹼または塩化/スルホ塩化油が必要です。スルホ塩化油を使用する場合は、各工程の後に(その後のアニーリング中に硫黄が合金中に拡散するのを防ぐため)、加工物を潤滑油除去剤またはアルカリ性のクリーナーで注意深く清浄化する必要があります。

**白鉛、亜鉛化合物、または二硫化モリブデンを含む潤滑剤は除去が困難であり、その後のアニーリング中に鉛、亜鉛、または硫黄が合金中に拡散して深刻な脆化を招く可能性があるため、推奨できません。同じ理由で、中間あるいは仕上げアニーリング処理の前に、あらゆる型材料、潤滑剤、あるいは異物も加工物から注意深く除去する必要があります。**

## 冷間加工(続き)

曲げ、ロール成形、ロール曲げ、およびブレーキ曲げ

下記の合金に適用できる推奨手順:

耐食合金  
耐熱合金

HAYNES® および HASTELLOY® の薄板および厚板は、単純な曲げ、ロール成形、ロール曲げ、およびプレスブレーキ曲げ加工に適しています。このような加工には、潤滑は一般的に必要ありません。最小曲げ半径のガイドラインを下表に示しますが、合金ごとに異なる場合があります。

材料の厚さ		推奨値
in	mm	最小曲げ半径*
<0.050	<1.27	1T
0.050-0.187	1.27-4.75	1.5T
0.188-0.500	4.76-12.70	2T
0.501-0.750	12.71-19.05	3T
0.751-1.000	19.06-25.40	4T

\*T = 材料の厚さ

断面が厚い場合は、延性を回復するための中間アニーリング処理を伴った複数のステップが必要です。これらの熱処理は、熱処理の項に記載されている推奨事項に従って行う必要があります、アニーリングの前に加工物の表面を清浄化することにも注意を払わなければなりません。

## 冷間加工(続き)

### 深絞り、引張成形、およびハイドロフォーム成形

下記の合金に適用できる推奨手順:

耐食合金

耐熱合金

HAYNES® および HASTELLOY® 合金は、深絞り、引張成形、ハイドロフォーム成形などに適しています。これらのプロセスには、一般に潤滑が必要です。耐熱合金の場合、優れた成形特性を有する細かい結晶粒の原材料が利用可能です。曲げ加工の場合と同様に、断面が厚い場合は、延性を回復させるための中間アニーリング処理をとらなければならない場合があります。これらの熱処理は、熱処理の項に記載されている推奨事項に従って行う必要があります。アニーリングの前に、加工物の表面を清浄化することにも注意を払わなければなりません。

耐熱合金の成形性の指針として、いくつかの合金に対する(潤滑有りの)オルセンカップ試験結果を、310ステンレス鋼と比較して以下に示します。

合金	平均オルセンカップ深さ*	
	in	mm
25	0.443	11.3
188	0.49	12.4
230®	0.46	11.7
556®	0.48	12.2
625	0.44	11.2
S	0.513	13
X	0.484	12.3
310 ステンレス鋼	0.505	12.8

\* 0.040-0.070 in (1.0-1.75 mm) の薄板の、3~12回の測定値の平均。

# 冷間加工(続き)

## スピニング および しごきスピニング

下記の合金に適用できる推奨手順:

耐食合金  
耐熱合金

スピニング加工とは、回転と力との組み合わせによって、薄板またはチューブを継ぎ目のない中空シリンダー、円錐状の半球体、またはその他の対称円形に成形するための変形プロセスです。人カスピニング(へら絞り)および機械力(またはせん断)スピニング(しごきスピニング)として知られている、2つの基本的な成形方法があります。前者の方法では、金属の著しい薄化は起こりませんが、後者では、金属はせん断力の結果として薄くなります。

ほとんど全ての HAYNES® および HASTELLOY® 合金は、一般に室温でスピニング成形できます。寸法精度に加えて、しわやひっかけ傷がないことを含めた品質管理は、作業者の技量に大きく依存します。

これらの合金をスピニング加工する場合、以下のような基本的なパラメータを考慮しなければなりません:

- ・ 速度
- ・ 送り速度
- ・ 潤滑
- ・ 材質
- ・ ひずみ硬化特性
- ・ 工具の材質、設計、表面仕上げ
- ・ 機械の荷重

速度、送り、および加圧力の最適な組み合わせは、通常、“新しい作業”が設定されたときに実験的に決定されます。連続作業中にマンドレルおよびスピニング工具の温度が変化した場合、均一な結果を得るために加圧力、速度および送りの調整を必要とすることがあります。

潤滑は全てのスピニング加工で使用する必要があります。通常は、機械に負荷をかける前にブランクに潤滑剤を塗布します。加工中に潤滑剤を加える必要があるかも知れません。スピニング加工中、加工物および工具には水溶性油のエマルジョンのような冷却剤を注ぐ必要があります。

**スピニング加工により潤滑剤が表面に磨き込まれ、その後のアニーリング処理中に(硫黄および/または塩素の拡散による)有害な表面効果が生じる可能性があるため、硫化または塩化潤滑剤を使用してはなりません。これらのタイプの潤滑剤が誤って使用された場合は、中間または仕上げアニールの前に(研削、研磨、または酸洗いによって)完全に除去しなければなりません。**

問題のない加工を実現するには、工具材料、加工品の設計、表面仕上げが非常に重要です。スピニング加工に使用するマンドレルは、硬く、耐摩耗性があり、通常の偏心荷重に起因する疲労に耐えなければなりません。

他の冷間成形加工の場合と同様に、冷間スピニング加工で製作された部品は、本指導書の熱処理の項に記載されている推奨事項に従って、中間および仕上げアニールをしなければなりません。

# 冷間加工(続き)

## チューブ成形

下記の合金に適用できる推奨手順:

耐食合金  
耐熱合金

HAYNES® および HASTELLOY® 合金は、標準的なパイプおよびチューブ曲げ装置で冷間成形することができます。ほとんどの曲げ作業に対して、曲げ半径の中心点からチューブの中心線までの最小推奨曲げ半径は、チューブ直径の3倍です。“U字型曲げ”の場合、直管部の中心線から中心線までの距離は、チューブ直径の6倍です。一方、チューブ直径の2倍の曲げ半径(曲げ半径の中心点からチューブの中心線まで)が可能になるチューブ直径と壁厚さの組み合わせがいくつかあります。

壁厚さに対する管の直径の比が増加するにつれて、歪みを防止するために、内径および外径保持の必要性がますます重要になります。曲げ半径が小さすぎると、(壁の薄化に加えて)、しわ、不十分な楕円率、および座屈が発生することがあります。

## 打ち抜き

下記の合金に適用できる推奨手順:

耐食合金  
耐熱合金

HAYNES® および HASTELLOY® 合金の打ち抜きは、通常は室温で行われます。穿孔は、最小直径を板厚の2倍に制限しなければなりません。穴の中心間距離は、直径の約3~4倍でなければなりません。

パンチとダイの片側当たりの隙間	
0.125 in (3.2 mm)までのアニールした薄板	板厚の3-5%
0.125 in (3.2 mm)を超えるアニールした薄板又は厚板	板厚の5-10%

# 冷間加工(続き)

## 切断 および せん断

下記の合金に適用できる推奨手順:

耐食合金  
耐熱合金

HAYNES® および HASTELLOY® 合金は、(多くのオーステナイト系ステンレス鋼と比較して)強度が高く、加工硬化速度が速いため、帯鋸切断は一般的に効率が悪いです。平板形状製品の場合、炭素鋼の厚さが切断する合金厚さの少なくとも50%以上の”はさみ型”せん断機で、せん断することができます。

一般に、合金の厚さが0.4375インチ(11.1 mm)までの場合はせん断可能であり、それ以上厚い材料は通常、研磨ディスク鋸またはプラズマアークによって切断されます。ウォータージェット切断は、通常は推奨されませんが、場合によっては実用的かも知れません。棒材および管状製品は通常、研磨ディスク鋸を用いて切断されます。

HAYNES® および HASTELLOY® 合金を首尾よく切断するには、酸化アルミニウムを樹脂結合した研磨砥石を使用します。典型的な粒度およびグレードは86A361-LB25W EXC-Eです。

HAYNES® および HASTELLOY® 合金は、従来のシステムを使用してプラズマアーク切断することができます。最高のアーク品質は、アルゴンと水素の混合ガスを使用することにより得られます。水素の代わりに窒素ガス使用することもできますが、切断の品質が低下します。シヨップエアおよび酸素含有ガスは不適切であり、これらの合金をプラズマ切断する場合には避けるべきです。

これらの合金の酸素アセチレン切断(溶断)は推奨されません。アークエア切断は可能ですが、炭素混在物を除去するために、切断後に研削が必要です。

# 溶接および接合のガイドライン

HASTELLOY® および HAYNES® 合金は、良好な溶接性で知られており、課された使用環境において、溶接ができて満足いく性能を発揮する能力を有した材料として定義されています。適切な溶接プロセスまたは手順を決定する際には、溶接された部品が最大限の性能を提供できるように考慮する必要があります。適切な溶接技術および手順が守られれば、従来のアーク溶接プロセスを用いて高品質の溶接ができます。しかしながら、より一般的な炭素鋼およびステンレス鋼と比べて、これらのタイプの合金を溶接するための適切な技術および違いに注意してください。以下の情報は、HASTELLOY® および HAYNES® 合金を適切に溶接するための基本を提供します。詳細については、各セクションに記載されている参考資料を参照してください。適切な溶接手順を決定する前に、合金特有の溶接に関する考慮事項を見直すことも重要です。

HASTELLOY® および HAYNES® 合金の溶接に用いられる最も一般的な溶接プロセスは、ガスタングステンアーク溶接 (GTAW/“TIG”)、ガスマタルアーク溶接 (GMAW/“MIG”)、および シールドメタルアーク溶接 (SMAW/“Stick”) です。これらの一般的なアーク溶接プロセスに加えて、プラズマアーク溶接 (PAW)、抵抗スポット溶接 (RSW)、レーザービーム溶接 (LBW)、および電子ビーム溶接 (EBW) のような、他の溶接プロセスも用いられます。サブマージアーク溶接 (SAW) は、母材への熱入力が高いことが特徴で、それによって歪み、高温割れ、および材料特性や性能に有害となるおそれがある第2相の析出が促進されるため、一般的に推奨されていません。溶接にフラックス成分を導入することも、溶着物中の化学組成を適切にすることを困難にします。

Ni/Co基合金の溶接特性は、多くの点で炭素鋼およびステンレス鋼と同様ですが、異なった溶接技法を必要とする重要な相違点があります。Ni/Co基の溶融した溶接金属は、炭素鋼またはステンレス鋼に比べて流動的ではないという意味において、比較的”動きがのろい”です。溶融池の”動きがのろい”という性質に加えて、NiおよびCo基合金は、溶接の溶け込みが浅いという特性があります。したがって、溶接継手のデザインは注意深く考慮する必要があり、十分な溶け込みが確保できる適切な溶接技術が必要です。金属表面上に形成される酸化物は、典型的には、溶接されるNi/Co基合金よりもはるかに高い温度で溶融するので、溶接前およびマルチパス溶接におけるパス間に酸化物を除去することが特に重要です。これらの重要な考慮事項については、後のセクションで詳しく説明します。

一般に、溶接入熱は低～中程度の範囲で制御することを推奨します。アーク溶接では、熱入力は溶接電流およびアーク電圧と直接比例し、運棒速度に反比例します。良好な溶接結果を得るためには、比較的低い溶接電流および遅い運棒速度を採用することを推奨します。いくつかの電極/トーチ操作を伴うストリンガービード溶接が好ましく、ウィービングビードはお勧めできません。好ましくは、溶接ビードはわずかに凸面であるべきであり、炭素鋼およびステンレス鋼で許容される平坦または凹状のビードは避けなければなりません。NiおよびCo基合金は、両方ともクレータ割れを発生する傾向があるため、溶接の始点と終点を研削することをお勧めします。



## 溶接および接合のガイドライン(続き)

溶接は、アニールした状態の母材に対して行うことを推奨します。冷間加工率が7%以上の材料は、溶接前に溶体化処理しなければなりません。冷間加工が大量に残留した材料の溶接は、溶接金属および/または溶接熱影響部に割れを生じさせる可能性があります。

不動態化などの化学処理は、通常、Ni/Co基溶接部の耐食性を獲得するためには必要ありません。固溶強化型合金は、通常、溶接したままの状態で使用することができます。場合によっては、特定の使用環境に曝される前に、溶接後の応力緩和が望ましいことがあります。析出強化型合金は、完全な特性を獲得するために、溶接後に熱処理しなければなりません。

高品質の本溶接を達成する方法として、溶接手順の仕様を作成し、認定することを提案します。このような溶接手順は、通常、規定の作成に必要であり、母材および溶加材、溶接継手のデザイン/形状、予熱/パス間温度制御、および溶接後熱処理(PWHT)要件などのパラメータを考慮する必要があります。Haynes International は、特定の溶接手順を作成、あるいは提供することはしていません。本書に示す一般的な溶接のガイドラインおよび合金特有の溶接時の考慮事項は、特定の溶接手順を作成するために使用されなければなりません。

## 溶接継手のデザイン

正しい溶接継手デザインの選択は、HASTELLOY® および HAYNES®合金の加工を成功させるために重要です。まずい継手デザインは、最適な溶接条件でさえも打ち消す可能性があります。Ni/Co基合金の溶接継手デザインにおける主な考慮事項は、溶接電極または溶加材の動作に対して、十分なアクセスのし易さと空間を提供することです。炭素鋼またはステンレス鋼の場合と比較して、幾分異なる溶接継手の幾何学的形状が要求されます;特に、より大きな溶接開先角度、より広いルート開口部(ギャップ)、および厚さを減らしたランド部(ルート面)が代表的な必要事項です。

溶接継手をデザインする場合に理解しておかなければならない最も重要な特性は、Niおよび Co基の溶融した溶接金属は、相対的に”動きがのろい”ことで、これは、溶融した溶接金属が溶接継手の側壁を容易に”濡らす”ように流れたり、広がらないことを意味します。したがって、適切な溶接ビードの連結および融合を達成するために、適切な電極操作および溶接ビードの配置を可能にするのに十分な広さがある継手開口部を確保することに注意しなければなりません。溶接アークおよび溶加材は、溶融金属を必要な場所に配置するように操作されなければなりません。継手は、最初の溶接ビードが凸面で溶着するようにデザインする必要があります。過度に狭い開先角度またはルート開口部は、凹形溶接ビードの形成を促進し、それによって溶接表面に張力を働かせて溶接金属の凝固割れを促進します。

さらに、溶接溶け込みは、典型的な炭素鋼またはステンレス鋼よりも著しく少ないです。この特性は、炭素鋼およびステンレス鋼と比較して、継手ルート部でのランド厚さ薄くすることを必要としています。これはNi/Co基合金の固有の性質であるため、溶接電流を増加させても溶接の溶け込みが浅いという特性は大幅には改善されません。

## 溶接継手のデザイン(続き)

ガスタングステンアーク溶接(GTAW)、ガスマタルアーク溶接(GMAW)、およびシールドメタルアーク溶接(SMAW)で使用される典型的な突合せ継手のデザインは、図1に示すように;(i) I型、(ii) V型、および(iii) X型です。ガスタングステンアーク溶接は、接合部の片側のみアクセスできる I型またはV型継手のルートパスを溶着するための好ましい方法として頻繁に用いられます。継手の残部は、適切な他の溶接プロセスを使用して埋めることができます。厚さ3/4インチ(19mm)より厚い厚板の開先溶接に対しては、J型が許容されます。このような継手は、溶加材の量および溶接を完了するのに必要な時間を低減します。特定の状況での他の溶接継手デザインを図2に示します。

溶接継手のデザインを支援するために、様々な溶接資料が利用可能です。詳細なガイダンスを提供する2つの資料は次のとおりです:

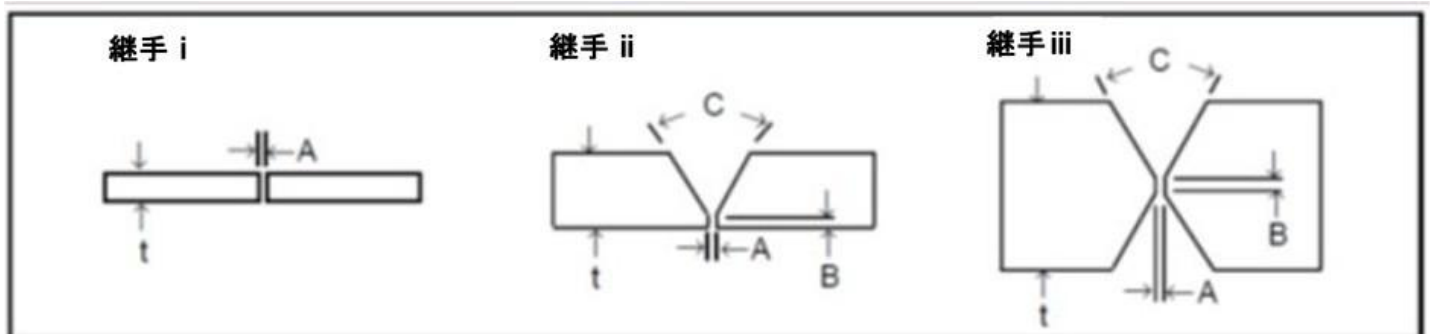
*Welding Handbook, Ninth Edition, Volume 1, Welding Science and Technology, Chapter 5, Design for Welding, pg. 157-238, American Welding Society, 2001.*

*ASM Handbook, Volume 6, Welding, Brazing and Soldering, Welding of Nickel Alloys, pg. 740-751, ASM International, 1993.*

上記に加えて、ASMEの圧力容器および配管規格のような製造規格によって設計要件が課されています。

溶接継手を満たすために必要な実際のパス数は、溶加材のサイズ(電極またはワイヤ直径)、電流値、および運棒速度を含む多数のファクタに依存します。溶接の単位長あたりに必要とされる溶接金属の推定重量は図1に示されています

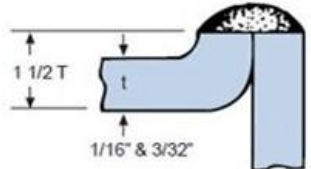
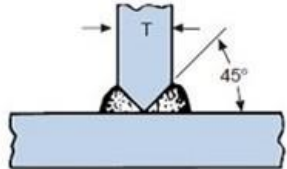
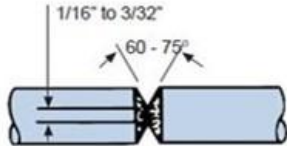
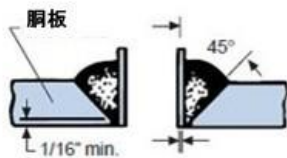

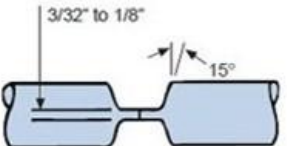
図1: 手動溶接に対する代表的な突合せ継手



# 溶接継手のデザイン(続き)

金属厚さ (t)		好ましい継手形状	ルート間隔 (A)		ルート面厚 (B)		開先角度(C)	溶接金属の推定必要重量	
in	mm		in	mm	in	mm		度	lbs/ft
1/16	1.6	I	0-1/16	0-1.6	N/A		None	0.02	0.03
3/32	2.4	I	0-3/32	0-2.4	N/A		None	0.04	0.06
1/8	3.2	I	0-1/8	0-3.2	N/A		None	0.06	0.09
1/4	6.3	II	1/16-1/8	1.6-3.2	1/32-3/32 (0.8-2.4)		60-75	0.3	0.45
3/8	9.5	II	1/32-5/32 (0.8-4.0)				60-75	0.6	0.89
1/2	12.7	II					60-75	0.95	1.41
1/2	12.7	III					60-75	0.6	0.89
5/8	15.9	II					60-75	1.4	2.08
5/8	15.9	III					60-75	0.82	1.22
3/4	19.1	II					60-75	1.9	2.83
3/4	19.1	III					60-75	1.2	1.79

図2: 特定の状況に対するその他の継手デザイン

<p><b>フランジコーナー溶接</b></p>  <p>フランジコーナー溶接は、シールドメタルアーク溶接には推奨できない。ガスタンクステン溶接の場合は、溶加棒は不要。</p>	 <p>最大溶け込み深さが必要な場合の継手。T=1/4 in (6.4 mm) 以上。溶接が難しい。</p>	 <p>直径が 1-1/2 in (38 mm) までの丸棒に対する突き合わせ継手(チゼル溶接)。</p>
<p><b>胴板開口部</b></p>  <p>マンホール、のぞき窓、配管フランジのような側面開口部に対する継手。チューブ保護管と混同しないこと。</p>	 <p>従来の現場溶接。溶加棒のサイズは、最も薄い部材と同じであること。</p>	 <p>直径が 1-1/2 in (38 mm) を超える丸棒に対する突き合わせ継手(チゼル溶接)。</p>

## 溶接継手の準備

溶接継手を適切に準備することは、HASTELLOY® および HAYNES® 合金の溶接にとって非常に重要な部分であると考えられます。溶接継手の準備の最初に、様々な機械的および熱的切断方法を利用することができます。合金厚板を望ましい形状および開先角度に切断するために、プラズマアーク切断が一般的に用いられます。ウォータージェット切断およびレーザービーム切断も使用できます。端部の準備は、NiおよびCo基合金に適用できる機械加工あるいは研削によって行うことができます。アークエア切断およびガウジングは許容されますが、炭素電極から炭素を取り込む可能性が非常に高いため、一般的には推奨されません。表面から炭素汚染を完全に除去しないと、その後の溶接または処理中に冶金学的問題が起こる可能性があります。さらに、エアアークガウジング中の高い入熱は、過剰な結晶粒の成長を促進し、材料の延性を低下させます。したがって、再凝固層に炭素汚染を引き起こさず、最小限の切断後の調整しか必要としないプラズマアーク切断が、一般的にアークエア切断およびガウジングの代替手段として優れています。酸素アセチレン溶接および切断の使用は、火炎から炭素を取り込むために推奨されません。

溶接の前に、全ての切断端面は、明るく光った金属面に調整する必要があります。溶接開先面に加えて、一般に溶接領域の上および底(フェースおよびルート)面の1インチ(25mm)幅のバンド域は、80グリットのフラッパーホイールまたはディスクを使用して光沢のある金属面に調整する必要があります。溶接前およびマルチパス溶接でのパス間で表面酸化物を除去することが特に重要です。表面酸化物の溶融温度は、溶接される母材よりもはるかに高いので、溶接中に固体のまま留まり、溶融池に閉じ込められて介在物を形成し、融合不良を生じる可能性があります。

清浄度は、Ni/Co基の溶接継手の準備において極めて重要な側面と考えられます。溶接作業の前に、溶接面および隣接する領域は、アセトンあるいは適切なアルカリ性クリーナーのような適切な溶剤で完全に清浄にしなければなりません。全てのグリース、切削油、クレヨンマーク、機械加工液、腐食生成物、塗料、スケール、染色浸透剤溶液、およびその他の異物は完全に除去する必要があります。いかなるクリーニング残渣物も、溶接前に除去しなければなりません。鉛、硫黄、リン、および他の低融点元素による溶接領域の汚染は、深刻な脆化または割れを引き起こすことがあります。CoおよびFe基合金の場合、溶接領域内での銅または銅含有材料との表面接触は避けなければなりません。表面に痕跡量の銅があっても、溶接の熱影響部に液体金属脆化の一種である銅汚染割れが生じる可能性があります。

炭素鋼との接触による表面の鉄汚染は、錆汚れ腐食の原因となることがありますが、深刻な問題とはみなされないため、一般には、使用前にこのような錆汚れを取り除く必要はありません。さらに、少量のこのような表面の鉄汚染が溶融池に溶け込んでも、溶接金属の耐食性に著しく影響をすることは思われません。このような汚染は重大な問題とはみなされませんので、問題を回避するために合理的な注意が払われれば、使用する前に特別な是正措置を講ずる必要はありません。

ステンレス鋼製のワイヤブラシは、通常、パス間に溶接部をクリーニングするには十分です。溶接中に使用するワイヤブラシは、NiおよびCo基合金のみに使用するよう保管しておき、炭素鋼には使用してはなりません。すべてのアーク溶接プロセスに対して、始点と終点を研削することを推奨します。酸素または二酸化炭素を含むシールドガスを使用する場合は、ワイヤブラシで磨く前に、パス間で軽く研削することが必要です。SMAW中のスラグ除去にはハツリおよび研削が必要で、その後にワイヤブラシで磨きます。

## 溶接物の温度管理および熱処理

HASTELLOY® および HAYNES® 合金の予熱は、通常、必要ありません。外気温あるいは室温は、十分な予熱温度と考えられます。しかしながら、温度を凍結温度以上に上げる、あるいは水分の凝結を防止するために、合金母材の加温を必要とする場合があります。例えば、合金を冷たい屋外の貯蔵庫から温かい作業場に持ち込むと、結露が発生することがあります。この場合、溶接金属にポロシティを生じさせる可能性のある凝結の形成を防ぐために、溶接近傍の金属は室温よりわずかに高く温めておく必要があります。可能であれば、加温は間接加熱、例えば、赤外線ヒータまたは室温に達するまでの自然加温、によって行わなければなりません。酸素アセチレン加温を使用する場合は、溶接領域ではなく母材全体を均等に加温する必要があります。トーチの火炎は、浸炭することがないように調節しなければなりません。火炎を均等に分散させる”ローズバッド”型のチップを使用することをお勧めします。加温によって局所的な溶融、あるいは粒界の一部が溶融することを避けるように注意しなければなりません。

中間パス温度とは、追加の溶接パスの溶着開始直前の溶接部の温度を指します。最高中間パス温度は 200° F (93° C) を推奨します。中間パス温度を制御するために、水冷および急速空冷のような補助冷却手段を使用することも許容しています。エアラインからの微量の油、グリース/汚れ、または溶接継手を冷却するために使用される硬水からの鉱物付着物によって溶接領域が汚染されないように注意する必要があります。薄肉の容器の外側に金物類を取り付ける場合は、熱影響部の広がりを最小限に抑えるために容器の内側(プロセス側)に補助冷却を行うことをお勧めします。

大部分の使用環境下では、耐食性合金および固溶強化型耐熱合金は溶接したままの状態で使用され、これらの合金の良好な溶接性を確保するための溶接後熱処理(PWHT)は、一般に必要ありません。溶接による残留応力を緩和するためのような特定の状況においては、溶接後熱処理が必要とされる、あるいは有益であることがあります。しかしながら、炭素鋼に広く用いられている温度での応力除去熱処理は、通常、これらの合金に対しては有効ではありません。PWHTがこれらの中間温度で行われると、ミクロ組織中に第2相が析出し、耐食性などの材料特性に悪影響を及ぼすことがあります。ほとんどの合金に対して、1000~500°F (538~816°C) の温度領域でのPWHTは避けなければなりません。応力がかかった炭素鋼部品の応力除去熱処理が必要な場合は、Haynes International に連絡して助言を受けてください。一般に、固溶強化型合金に対して、唯一、許容できるPWHTは、完全溶体化処理です。合金に対する適切な溶体化処理温度を決定するには、熱処理ガイドラインを参考にしてください。アニーリング時間は、通常、溶接継手の厚さに見合ったものです。

析出強化型合金の場合、通常は、適切な材料/溶接特性を成長させるためにPWHTが必要です。ほとんどの場合、これには完全溶体化処理が含まれ、引き続いて時効硬化熱処理が行われます。合金に対する適切なアニーリングおよび時効硬化熱処理工程を決定するためには、熱処理ガイドラインを参考にしてください。

# 溶接欠陥

溶接の不連続性は、米国溶接学会によって、“機械的、冶金学的または物理的特性における均質性の欠如のような、材料の典型的な組織の断絶”として定義されています。溶接欠陥は、溶接部の有用性を損なわせる不連続性の一種であり、最小限の適用される許容規格/仕様を満たせなくする可能性があります。溶接欠陥は、溶接のプロセス/手順に関連しているか、または溶接される合金の化学組成または冶金学に関連している可能性があります。

溶接金属のポロシティは、水素、酸素、または窒素などの特定のガスによる汚染の結果、固化中にガスが閉じ込められることによって形成される空洞型の溶接欠陥です。水素の集積によって生じるポロシティは、溶接継ぎ目領域および溶加金属に炭化水素汚染物質および湿気がないようにすることによって最小限に抑えることができます。酸素と窒素によるポロシティを避けるためには、高純度のシールドガスを使用して溶融池を適切にシールドし、十分なシールドガス流量を用いることが重要です。ポロシティは、HASTELLOY® および HAYNES® の溶接部で発生し得ますが、ほとんどの合金は、溶接中に形成されるガスに対して自然親和性を有するかなりの量のCrを含有するため、ポロシティに特に影響されることはありません。

溶接金属の巻き込みは、溶融池内に酸化物が取り込まれた結果として形成されます。これは、ほとんどの合金の表面に形成される強固な酸化被膜から生じます。表面酸化物の融点は、通常、母材金属よりもかなり高いため、溶接中は固体のまま留まり、溶融池に取り込まれやすくなります。したがって、表面酸化物は、溶接前およびマルチパス溶接のパスの間に除去することが特に重要です。GTAWの間にタングステン電極が溶融した溶融池に偶然に接触した場合、または溶接電流が過剰であった場合、溶接金属にタングステンの巻き込みが発生します。アルミやマグネシウムのような酸素に対して強い親和性を有する元素は、酸素と結合して溶接金属に酸化物の巻き込みを形成します。スラグ巻き込みは、SMAW、SAW、FCAWなどのフラックスを使用したプロセスに伴って発生します。残留スラグが、不適切な溶接ビードの重なり、溶接止端部における過剰なアンダーカット、または先行する溶接ビードの不均一な表面形状によって形成された空洞またはポケットに取り込まれると、溶接金属内に巻き込みが形成されます。したがって、フラックスを使用したプロセスにおける重要な考慮点は、スラグを溶接パスの間に除去することが容易であることです。巻き込みは、溶接部から削り取らなければなりません。さもないと、早期に割れを発生させ、機械的特性および使用性能に悪影響を及ぼします。

遭遇するその他の一般的なプロセス関連の欠陥には、アンダーカット、融合不良/溶込み不足、および歪みがあります。これらの欠陥は、一般に不適切な溶接技術および/または溶接パラメータに起因します。アンダーカットとは、通常は溶接のルート部や止端部において、母材金属に溶け込んだ溝で、溶接電流が過剰な場合に発生します。この不連続性は、溶接部の周囲に切欠きを形成し、溶接部の強度を著しく弱めます。融合不良は、Ni/Co基の溶融した溶接金属の”動きがのろい”性質および不十分な溶接溶け込み特性によって促進されます。

## 溶接欠陥(続き)

HASTELLOY®および HAYNES® 合金の歪み特性は炭素鋼と同様で、熱膨張係数が低いため、オーステナイト系ステンレス鋼の溶接部より歪みが小さいという傾向があります。治具、固定具、棧、支柱、溶接ビードの配置と配列は、歪みを最小限に抑えるのに役立ちます。可能であれば、中立軸を中心とした均等溶接を行うことで、歪みを最小限に留めることができます。組立品の適切な固定およびクランプは、溶接作業を容易にし、薄肉部分の座屈および反りを最小にします。可能であれば、幅と長さ全体に余材部を設けることを推奨します。その後、最終寸法にするために余分な材料を除去します。様々な継手デザインに対する溶接歪みを図 3に示します。

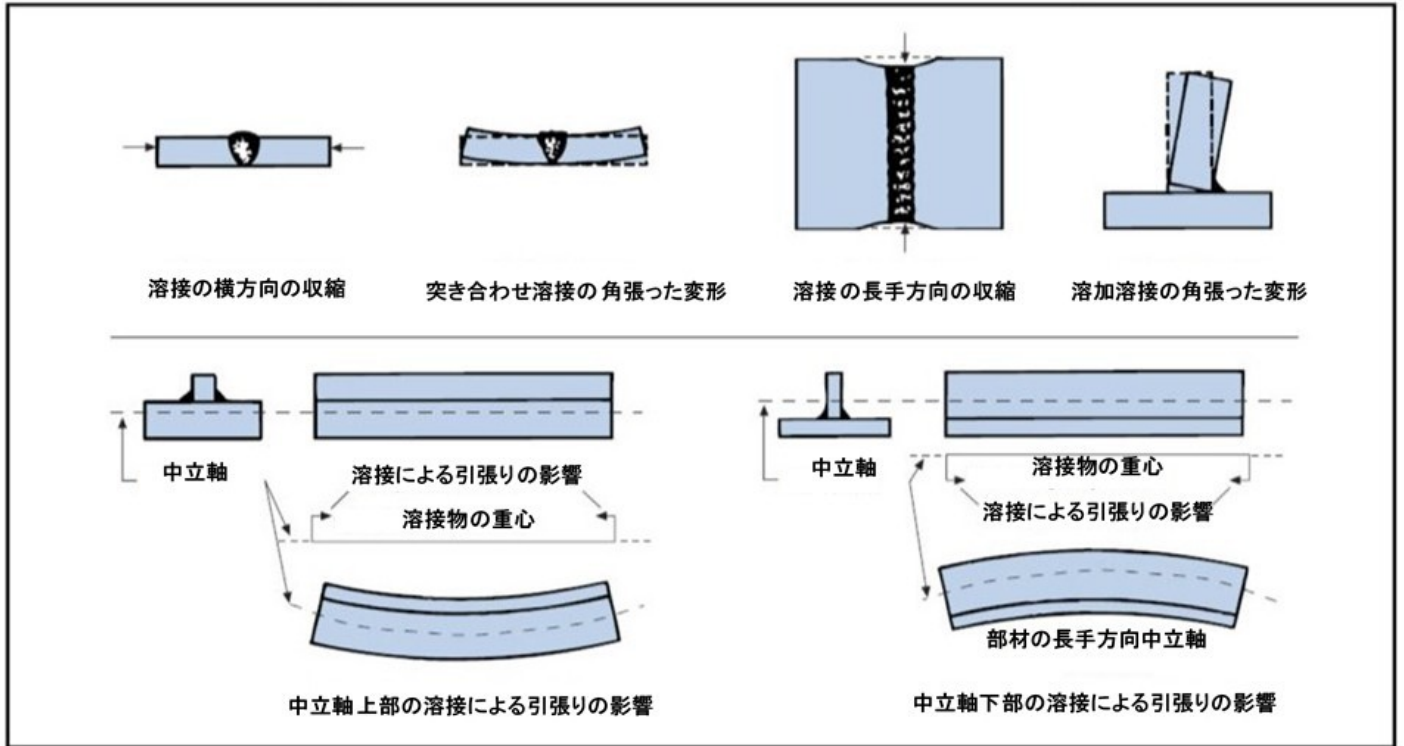
HASTELLOY®および HAYNES® 合金の通常の加工中に溶接割れが起こることはまれであり、割れの発生がほとんどない、大きくて複雑な部品の加工が期待できます。遭遇する最も一般的なタイプの溶接割れは高温割れであり、これはマイクロ組織内の液体の存在と関連しています。高温割れは、溶接金属および溶接部の熱影響部で発生し、通常、結晶粒界に沿った液体フィルムに起因します。これらの歪み耐性のないマイクロ組織は、すべての合金の溶融および凝固範囲内に昇温された温度において一時的に生じます。標準化学組成が原因で、特定の合金は、他の合金よりも高温割れの影響を受けやすくなっています。一般に、耐熱合金は、合金含有量が高いため、高温割れはより一般的な現象です。硫黄およびリンのような不純物元素、ならびにホウ素およびジルコニウムのような少量の合金添加元素は、それらが非常に低い濃度で存在していても、割れ感受性に強く影響します。

感受性の強いマイクロ組織に加えて、溶接部の引っ張り応力レベルは高温割れの重要な因子です。金属が凝固して冷却するときに生じる複雑な熱応力のために、溶接中に応力が発生することは避けられません。これは、ある程度は溶接継手の幾何形状および厚さに起因する、溶接部に固有の拘束に関連しています。一般に、接合部厚さが厚い溶接部は、高温割れに対してより敏感です。さらに、運棒速度が速いために形成される”涙滴形状”の溶融池は明確な溶接中心線を形成し、ここでは元素の偏析が高められ、横方向の応力が高くなるため、割れ感受性を増加させる傾向があります。溶接面に張力かける大きな凹形溶接ビードは、凝固割れを促進する傾向があり、避けるべきです。Ni基合金の溶接割れのメカニズムおよび溶接冶金に関するさらなる情報は、以下の教科書に記載されています:

*J.N. DuPont, J.C. Lippold, and S.D. Kiser, Welding Metallurgy and Weldability of Nickel-Base Alloys, John Wiley & Sons, Inc., 2009.*

# 溶接欠陥(続き)

図 3: 様々な継手デザインに対する溶接歪み



## 溶接後検査および補修

溶接部の意図する目的に対する適合性を判断するためには、健全な加工の実践と品質保証の一部として、ある程度の非破壊検査/検査(NDE/NDT)を実施しなければなりません。非規格適合加工の場合、NDEは目視または染色浸透探傷検査のような単純なものとなる場合があります。規格適合加工の場合は、特定の必須の検査が必要な場合があります。これらのNDEの方法は、溶接部の最終容認のみならず、マルチパス溶接中の中間検査の両方に対して考慮する必要があります。

NDEの方法は、炭素鋼およびステンレス鋼に使用される方法と同様です。高温割れなどの表面欠陥を明らかにするためには、染色浸透探傷検査が一般的に使用されます。放射線透過検査および超音波検査は表面下欠陥を検出するために使用することができ、溶接部の健全性を完全にチェックすることができます；しかしながら、結果の解釈が難しく、これらの方法は一般に隅肉溶接の検査にはあまり適していません。磁粉探傷検査は、非磁性であるNi/Co系合金に対しては有効なNDE方法ではありません。さらに詳しい情報が必要な場合は、加工業者が、Ni/Co基合金溶接のNDEに経験がある外部の研究機関に相談することを推奨します。

品質または機械的完全性に影響を及ぼすと考えられる溶接欠陥は、除去して補修する必要があります。除去技術には、研削、プラズマアークガウジング、およびアークエアガウジングが含まれます。先に溶接継手の準備のセクションで説明したように、アークエアガウジング中に溶接継手領域の炭素汚染が発生しないように厳重な注意を払わなければなりません。全ての好ましくない欠陥が除去されたことを保証するために、ブローホールは染色浸透探傷検査することを提案します。その後、補修するブローホールは、溶接補修の前に完全に清掃する必要があります。Ni/Co基合金は溶接溶込み特性が低いため、溶接電極/ビードの操作を可能にするために、ブローホールは研削で十分に広げ、溶接溝には十分な側壁隙間を設けなければなりません。溶接ビードを自生溶接する、または欠陥上に追加の溶加材を溶着させることによって、割れおよび欠陥を”ヒーリング”または”ウォッシュアウト”する技法は推奨されません。



# ガスタングステンアーク溶接 (GTAW/“TIG”)

ガスタングステンアーク溶接 (GTAW) プロセスは、非常に汎用性があり、全ての溶接姿勢が可能な溶接プロセスで、Ni/Co基合金の接合に広く使用されています。GTAWでは、溶接のための熱は、非消耗タングステン電極と加工物との間に確立された電気アークから生成されます。GTAWは、手動でも自動設備に取付けてでも実施でき、溶接による修理だけでなく、生産にも使用できます。GTAWは、溶接熱の精密な制御を提供するプロセスであり、それ故、薄い母材金属の溶接および断面が厚い溶接のルートパスの溶着に日常的に使用されています。GTAWプロセスの主な欠点は、手動溶接中の溶接金属の溶着速度が遅いために生産性が低いことです。

従来、Ni/Co系合金のGTAWにはトリウム2%入りのタングステン電極 (AWS A5.12 EWTh-2) が使用されてきましたが、EWTh-2および他のトリウム入りタングステン電極に伴う健康上の懸念から、今では他の組成がより一般的になっています。EWTh-2電極に含まれている酸化トリウムは、外部放射の危険性が少ない低レベル放射性物質で、摂取や吸入による内部危険性がある物質です。溶接作業者にとっての最大のリスクは、所望の円錐形状を維持するためにタングステン電極チップを研削する時に、放射性粉塵を吸入することです。そのため、発生源で粉塵を制御するために局所的な排気換気装置を使用する必要があり、必要に応じて呼吸保護具で補完し、研削装置から粉塵を処理する際の曝露の危険性を制御することに注意を喚起しなければなりません。これらの健康上の懸念の結果、トリウム入りタングステン電極は、特定の統治団体および組織によって段階的に廃止されつつあります。幸いにも、セリウム2%入り (AWS A5.12 EWCe-2) およびランタン入り (AWS A5.12 EWLan-2) 電極のような、EWTh-2に匹敵する性能を提供する代替品があります。異なるタイプのタングステン電極についての更なる情報は、米国溶接協会の仕様書: AWS A5.12/A5.12M (アーク溶接および切断のためのタングステンおよび酸化物分散型タングステン電極の仕様) を参照してください。

タングステン電極の直径は、溶接継手の厚さおよび溶加ワイヤの直径に応じて選択する必要があります。電極は、0.040~0.060 インチ (1.0~1.5 mm) 直径の平らな先端で、30° ~60° の角度を持ったコーン形状に研削することを推奨します。推奨するタングステン電極の形状については図4を参照してください。

ほとんどの溶接に対して、シールドガスには、純度が99.996%以上の溶接グレードのアルゴンを使用することをお勧めします。ヘリウム、またはアルゴン/ヘリウムまたはアルゴン/水素の混合ガスは、溶接の溶け込みを増加させるため、高運棒速度、高度に機械化された溶接作業のような特定の状況において有利です。シールドガスの流量は重要です; 流量が少なすぎると溶融池が十分に保護されず、流量が多すぎると乱れが増加して空気を吸い込むことがあります。典型的には、アルゴン100%のシールドガス流量は、20~30 ft<sup>3</sup>/hr (CFH) (9~14ℓ/min) の範囲です。一般に、シールドガスキャップは、シールドガスをより低速で供給できるように、実用的な大きさでなければなりません。溶接トーチには、ガスの流れを安定させ、最適なシールドガスのシールド範囲を提供するために、ガスレンズを装備することもお勧めします。溶接グレードのシールドガスは非常に高純度ですが、少量の空気でも保護シールドを損ない、溶接金属の酸化/変色やポロシティを発生させる可能性があります。これは、ファン、冷却システム、通気などからの空気の移動、あるいは緩んだガスキャップまたは他の溶接トーチ部品からのシールドへの空気の漏れによって引き起こされる可能性があります。適切なシールドが達成されると、溶着された状態の溶接金属は、典型的には光沢のある外観を呈し、パス間でワイヤにより軽く磨くことが必要となるだけです。

## ガスタングステンアーク溶接(GTAW/“TIG”) (続き)

溶接トーチのシールドガスに加えて、溶接継手のルート側で溶接グレードのアルゴンを用いた

バックシールドが推奨されています。流量は、通常5~10 CFH (2~5 l/min)の範囲です。銅の裏当ては、溶接部ルート側の溶接ビード形状を調整するためにしばしば使用されます。裏ガスは、しばしば裏当ての長さ方向に沿って設けられた小さな穴を通して導入されます。裏当てを使用できない状況があります。これらの条件の下では、裏当てなし突合せ溶接がしばしば行われます。このような溶接条件は、パイプまたはチューブの周方向の突き合わせ溶接中にしばしば遭遇します。継手のルート側へのアクセスが不可能なこれらの条件の下では、特別なガス流量条件が確立されています。これらの裏当てなし突合せ溶接条件下では、トーチ流量を約10 CFH(5 l/min)に減らし、バックシールドガス流量を約40 CFH(19 l/min)に増やします。パイプ溶接中のバックシールドガスに関する詳細な情報は、ご要求があれば、Haynes Internationalから提供いたします。

溶接トーチは、水平から90°の傾斜角度および0°~5°の僅かに傾いた前進角度で、加工物に対して基本的には垂直に保持することを推奨します。トーチ前進角度が大きい(前進方向に大きく傾けた)場合、シールドガスに空気が引き込まれ、溶接部が汚染される可能性があります。アーク長は、特に自生溶接中は、できるだけ短く維持する必要があります。母材を溶かすのに十分なだけの電流を使用し、溶加材の適切な融合を可能にするストリンガー法、またはウィービング法を推奨します。タングステン電極との接触を避けるために、溶加金属は溶融池の先端に慎重に追加する必要があります。溶接作業の間、酸化を防止するために溶接溶加材の先端は常にシールドガスの下に保持する必要があります。溶融池を一時休止する、または“溜める”ことは、溶接熱入力が増加するため、推奨されません。

GTAWプロセスの電気極性は、直流棒マイナス(DCEN/“正極性”)でなければなりません。

HASTELLOY® および HAYNES® 合金溶接に対する典型的な手動GTAWのパラメータを表1に示します。パラメータは、最終的には特定の溶接電源、溶接継手の形状、溶接者の技量レベルなどの多くの要因に依存する近似値として見てください。したがって、これらのパラメータは、特定の溶接手順を開発するためのガイドラインとして使用することを推奨します。ルートパスを溶着するためには、より小さな直径の溶加ワイヤを推奨します。高周波スタート、プレパージ/ポストパージおよびアップスロープ/ダウンスロープ(またはフットペダル制御)を備えた電源を強くお勧めします。溶接移動速度はNi/Co基溶接の品質に大きな影響を与え、通常は炭素鋼およびステンレス鋼の場合よりも低いです。手動GTAWの推奨移動速度は、4~6 in/min(ipm)/100~150 mm/minです。

# ガスタングステンアーク溶接 (GTAW / “TIG”) (続き)

図 4: タングステン電極の形状

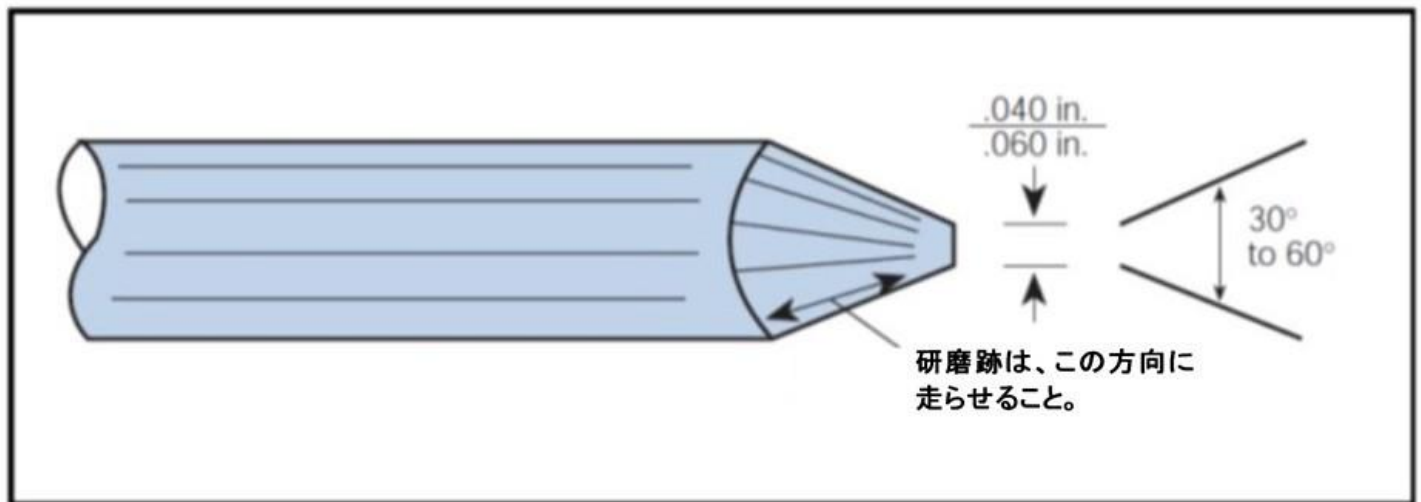


表1: 典型的な手動タングステンアーク溶接パラメータ (下向き姿勢)

継手部厚さ		タングステン電極直径		溶加ワイヤ直径		溶接電流	アーク電圧
in	mm	in	mm	in	mm	Amps	Volts
0.030-0.062	0.8-1.6	0.062	1.6	0.062	1.6	15-75	9-15
0.062-0.125	1.6-3.2	0.062/0.093	1.6/2.4	0.062/0.093	1.6/2.4	50-125	9-15
0.125-0.250	3.2-6.4	0.093/0.125	2.4/3.2	0.093/0.125	2.4/3.2	100-175	12-18
> 0.250	>6.4	0.093/0.125	2.4/3.2	0.093/0.125	2.4/3.2	125-200	12-18

## ガスマタルアーク溶接 (GMAW/“MIG”)

ガスマタルアーク溶接 (GMAW/”MIG”) プロセスは、溶接ワイヤの電極と加工物との間に確立された電気アークを利用するプロセスです。GMAWは、手動、半自動、または自動プロセスとして実施することができ、様々なプロセスバリエーションによって提供される柔軟性は、多くの用途において有利です。GMAWは、GTAWまたはSMAWと比較して溶接金属の溶着速度を大幅に向上させ、半自動プロセスとして実施する場合、一般的には溶接者の技量をほとんど必要としません。しかしながら、GMAW装置は、より複雑で、可搬性が低く、一般的に、GTAWおよびSMAWプロセスよりも日常的な保守を必要とします。GMAWは、耐食合金の溶接および厚肉溶接に対する最も一般的なプロセスです。

GMAWでは、ワイヤ電極の終端部において溶融金属が加工品に移動するメカニズムが、溶接特性に大きな影響を与えます。GMAWでは、短絡移行、グローブユラー移行、およびスプレー移行という3つの金属移行モードが可能です。さらに、パルススプレーと呼ばれるスプレー移行モードの変化形があります。

HASTELLOY® および HAYNES® 合金のGMAWに対する電気極性は、直流棒プラス(DCEP/ “逆極性”) でなければなりません。下向き姿勢溶接に対して、異なるGMAW移行モードに対する代表的なパラメータを表2に示します。GMAW電源が異なると、設計、操作、および制御システムが大きく異なるため、ここに示したパラメータは特定の溶接装置を用いて適切な溶接特性を達成するための推定範囲として見てください。GMAWの移動速度は、通常6~10 in/min (ipm)/150~250 mm/minです。

## ガスマタルアーク溶接 (GMAW/“MIG”) (続き)

短絡移行は最小電流および電圧範囲で起こり、その結果、溶接熱入力は低くなります。典型的には、より小さな直径の溶加ワイヤを使用して行われ、目違い溶接および薄肉断面の接合に適した、相対的に小さく容易に制御できる溶融池を生成します。しかしながら、熱入力が低いと、特に厚い断面を溶接するときやマルチパス溶接のときに、短絡移行が融合不良(コールドラップ)を生じやすくなります。

グロービュラー移行は、短絡移行よりも高い電流および電圧レベルで起こり、溶融金属の大きくて不規則な溶滴が特徴です。グロービュラー移行モードは、理論的にはNi/Co基合金を溶接するために使用することができますが、欠陥の形成を促進する一貫性のない溶け込みおよび不均一な溶接ビード輪郭を生成するため、めったに使用されません。溶滴の離脱および移行には重力が重要であるため、グロービュラー移行は、一般に下向き溶接に限定されます。

スプレー移行は、最高の電流および電圧レベルで起こり、小さな金属溶滴の高度に指向された流れによって特徴付けられます。材料の厚い断面を溶接するのに最も効率的な、比較的高い溶着速度を伴う高熱入力プロセスです。しかしながら、主に下向き溶接においてのみ有効であり、その高い熱入力は、使用性能に影響を及ぼす可能性がある高温割れおよびマイクロ組織における第2相の形成を促進します。

パルススプレー移行は、高度に制御されたスプレー移行の変形であり、スプレー移行が起こる高いピーク電流とより低いベース電流との間で溶接電流が交番します。その結果、スプレー移行よりも著しく低い平均溶接電流で、安定した低スパッタプロセスになります。パルススプレーはスプレー移行に比べて熱入力が低くなりますが、短絡移行に共通する融合不良は起こりにくくなっています。この溶接方式は、すべての溶接姿勢および広範囲の材料厚さに対して有効です。ほとんどの状況において、Haynes International は、HASTELLOYS<sup>®</sup> および HAYNES<sup>®</sup> 合金のGMAWにパルススプレー移行を使用することを強く推奨しています。共同運動性制御および波形調整(“適応パルス”)ができる現代的な電源の使用はパルススプレー移行にとって非常に有効です。これらの先進技術は、パルス電流、パルス持続時間、ベース電流、およびパルス周波数のようなパルスパラメータを制御システムに組み込んでワイヤ送給速度にリンクさせているため、パルススプレー移行の使用を容易にしています。

## ガスマタルアーク溶接 (GMAW/“MIG”) (続き)

シールドガスの選択は、GMAW手順開発にとって重要です。Ni/Co基合金の場合、保護シールドガス雰囲気は、通常、アルゴンまたはヘリウムとアルゴンの混合ガスによって提供されます。アルゴンの比較的低いイオン化エネルギーは、より良好なアーク開始/安定性を促進し、その低い熱伝導率は、より深い、指状の溶け込み形状を提供します。ヘリウムは、単独で使用すると不安定なアーク、過剰なスパッタ、および過度に液状化した溶融池を生成しますが、アルゴンに添加すると、より液状化した溶融池を提供し、それによって濡れ性が高くなり、溶接ビードがより平坦になります。酸素または二酸化炭素を添加したシールドガスは、他の金属では普通に使用されていますが、Ni/Co基合金の溶接には避けるべきです。これらの添加は、表面を非常に酸化し、溶接金属のポロシティ、不規則なビード表面、および融合不良を促進します。最適シールドガスは、溶接継手のデザイン/形状、溶接姿勢、および所望の溶け込み形状などの多くの要因に依存します。ほとんどの場合、75%アルゴンと25%ヘリウムの混合ガスが推奨されます; 15~30%のヘリウム含有量で良好な結果が得られています。短絡移行の間に、ヘリウムをアルゴンに添加することは、融合不良につながる過剰な凸状の溶接ビード形成を避けるのに役立ちます。スプレー移送の場合、純粋なアルゴンまたはアルゴン - ヘリウム混合ガスで良好な結果を得ることができます。ヘリウムの添加は濡れ性を大きく向上させるので、パルススプレー移行に一般に必要とされます。

アルゴンとヘリウムは不活性ガスであるため、溶着したままの溶接表面は、最小限の酸化に止まり、明るく光っていることが予想されます。この場合、マルチパス溶接中のパス間に研削することは必須ではありません。しかしながら、溶接面にはいくらかの酸化または“すす”が認められるかも知れません。その場合、酸化された表面を除去し、その後の溶接ビードの健全な溶着を確実にするために、溶接パス間にワイヤブラシによる強い磨き、および/または軽い研削/表面調整(80グリット)を行うことを推奨します。シールドガスの流量は、一般に25~45 CFH(12~21 l/min)の範囲でなければなりません。流量が低すぎると溶接部が十分にシールドされず、流量が大きすぎるとアークの安定性が阻害されます。GTAWの場合と同様に、溶接継手のルート側が過度に酸化されないように、バックシールドを推奨します。バックシールドができない場合は、溶接後に溶接継手のルート側を研削して、酸化された溶接金属および溶接欠陥をすべて除去する必要があります。その後、溶接継手は、必要に応じて両側から溶接で埋めることができます。

GMAWの間、溶接ガンは、傾斜角度と前進角度の両方がほぼ0°で、加工物に対して垂直に保持する必要があります。視認性のために、垂直からわずかに傾けることが必要かもしれません。ガンが垂直から離れすぎて配置されていると、大気からの酸素が溶接ゾーンに引き込まれ、溶けた溶融池が汚染される可能性があります。スプレー移行溶接には常に水冷式の溶接ガンが推奨され、常により高い溶接電流が用いられます。

電極チップやワイヤコンジット/ライナなどのGMAW装置の一部は摩耗が激しく、定期的に変換する必要があることを認識しておかなければなりません。摩耗または汚れたライナは、ワイヤの供給を不規則にし、その結果、アークが不安定になる、あるいは、“鳥の巣”として知られているワイヤの詰まりを起こすことがあります。ガンケーブルの鋭角状の曲がりをも最小限に抑えることを推奨します。可能であれば、溶接中にガンケーブルがほぼ真直ぐになるように、ワイヤフィーダを配置する必要があります。

## ガスマタルアーク溶接 (GMAW/“MIG”) (続き)

表 2: 典型的なガスマタルアーク溶接パラメータ (下向き溶接)

ワイヤ直径		ワイヤ供給速度		溶接電流	平均アーク電圧	シールドガス
in	mm	ipm	mm/s	Amps	Volts	-
短絡移行モード						
0.035	0.9	150-200	63-85	70-90	18-20	75Ar-25He
0.045	1.1	175-225	74-95	100-160	19-22	75Ar-25He
スプレー移行モード						
0.045	1.1	250-350	106-148	190-250	28-32	100Ar
0.062	1.6	150-250	63-106	250-350	29-33	100Ar
パルススプレー移行モード*						
0.035	0.9	300-450	127-190	75-150 Avg.	30-34	75Ar-25He
0.045	1.1	200-350	85-148	100-175 Avg.	32-36	75Ar-25He

\*詳細なパルススプレーパラメータは、ご要求があれば提供できます。

## シールドメタルアーク溶接 (SMAW/“Stick”)

シールドメタルアーク溶接 (SMAW/“Stick”) は、消耗性の被覆電極棒と加工物との間にアークを発生させるプロセスです。SMAWは、すべての溶接姿勢、ならびに生産および修理の両方の溶接に使用できるため、多用途性があることでよく知られています。SMAWは、機器要件の点で最も簡単な溶接プロセスの1つであり、遠隔地で容易に操作することができます。しかしながら、厳密には手動溶接プロセスであり、一般に高い溶接者の技量を必要とします。さらに、典型的には、適用が約0.062 in (1.6mm) よりも厚い材料に制限されます。

SMAW用のHASTELLOY®およびHAYNES®被覆電極は、電極の使用可能性、溶着物の化学組成、および溶接金属の健全性および機械的特性を決定するために多数の品質試験を受けます。被覆電極は、一般に、適合する母材の化学組成に対応する化学組成を有する溶着物を生成するように処方されます。被覆配合物は、一般に、特定の合金に応じてわずかに塩基性から、わずかに酸性にまで分類されます。Ni基被覆電極の分類要件の詳細については、AWS A5.11/A5.11M: シールドメタルアーク溶接用ニッケルおよびニッケル合金溶接電極の仕様 (米国溶接協会) を参照してください。

被覆電極は、使用する前は防湿の蓋付き容器に密封しておかなければなりません。蓋付き容器を開けた場合は、すべての被覆電極を電極保管オーブンに保管しなければなりません。電極保管オーブンの温度は、250~400° F (121~204° C) に維持することをお勧めします。被覆電極が制御されていない雰囲気曝された場合は、炉内において600~700° F (316~371° C) で2~3時間加熱することで再調整できます。

## シールドメタルアーク溶接 (SMAW/“Stick”) (続き)

下向き溶接に対する典型的なSMAWパラメータを表3に示します。被覆電極はAC/DCとして分類されますが、ほとんどすべての状況において、電氣的極性は直流棒プラス(DCEP/“逆極性”)でなければなりません。アークの安定性を最大にし、溶融池を制御するためには、短いアーク長を維持することが重要です。電極は、一般に、約 $20^{\circ}$  ~  $40^{\circ}$  の引き角で溶融池に対して後退させます(後退法)。一般的には、ストリンガービード溶接法が好ましいですが、溶融した溶接金属を必要な場所に置くためには、何回かの電極操作およびウィービングが必要となるかも知れません。ウィービングの回数は、溶接継手の形状、溶接姿勢、および被覆電極のタイプに依存します。経験則では、最大ウィービング幅は電極芯線直径の約3倍でなければなりません。溶着させた時点で、溶接ビードは、好ましくは、わずかに凸型の表面輪郭を示さなければなりません。適切な溶接電流は、被覆電極の直径に基づいています。推奨された電流範囲内で操作され場合、電極はスパッタが最小の良好なアーク特性を示すはずですが。過度の電流を使用すると、電極の過熱、アーク安定性の低下、電極被覆の破損、および溶接金属のポロシティを生じることがあります。過度のスパッタは、アーク長が長すぎる、溶接電流が高すぎる、極性が逆極性でない、または電極被覆によって水分が吸収されたことを示しています。SMAWの推奨運棒速度は $3 \sim 6 \text{ in/min (ipm) / } 75 \sim 150 \text{ mm/min}$ です。

目違い溶接は、直径が $0.093 \text{ in (2.4mm)}$  および直径が $0.125 \text{ in (3.2mm)}$  の電極でのみ推奨されます。目違い溶接の間、アンペア数は、表3の推奨範囲の下限まで減らす必要があります。立・横向き溶接中にビード形状を比較的平坦に保つためには、ウィービングビード技法が必要です。 $0.093 \text{ in (2.4mm)}$  の電極を使用すると、必要なウィービング幅が減少し、平坦なビードが生成されます。立・横向き溶接では、電極姿勢の範囲は、前進法( $20^{\circ}$  までの押し角)から後退法( $20^{\circ}$  までの引き角)までが可能です。上向き溶接では、後退法(引き角: $0 \sim 20^{\circ}$ )が必要です。

電極が保護雰囲気生成を開始するのに短時間を要するので、始動時にポロシティが生じることがあります。これは、HASTEL-LOY® B-3® 合金のような特定の合金に特有の問題です。この問題は、母材と同じ合金のスタートタブを使用するか、各溶接開始時に健全な溶接金属に達するまで研削することによって最小限に抑えることができます。溶接終端部にも小さなクレータ割れが発生することがあります。これらは、アークを中断する直前に、クレータを埋めるためにわずかなバックステップ動作を行うことで最小限に抑えることができます。すべての溶接の始点と終点を健全な溶接金属に達するまで研削することをお勧めします。

溶接面に形成されたスラグは完全に除去しなければなりません。これは、最初に溶接/ハツリハンマでハツリ、次に表面をステンレス鋼製のワイヤブラシで磨くことによって達成できます。マルチパス溶接では、次のビードが溶着される前に最後に溶着された溶接ビードから全てのスラグを除去することが基本です。残った溶接スラグは、溶接部の耐食性を損なう可能性があります。

# シールドメタルアーク溶接 (SMAW/“Stick”) (続き)

表 3: 典型的なシールドメタルアーク溶接パラメータ(下向き溶接)

電極直径		アーク電圧	溶接電流
in	mm	Volts	Amps
0.093	2.4	22-25	45-75
0.125	3.2	22-25	75-110
0.156	4	23-26	110-150
0.187	4.7	24-27	150-180

## プラズマアーク溶接 (PAW)

プラズマアーク溶接 (PAW) プロセスは、非消耗性タングステン電極と加工対象物との間の収縮アークを利用するガスシールド溶接です。移行性アークは、高いエネルギー密度とプラズマジェット速度を保有しています。溶融モードおよびキーホールモードと呼ばれる 2つの異なる溶接モードがあります。溶融モードは、より低い溶接電流を利用し、GTAW で形成されたものと同様の溶融池を生成し、それにより、アーク下の加工対象材料の一部が溶融します。キーホールモードでは、より高い溶接電流を利用し、アークが加工対象材料を完全に貫通して、接合部厚さを貫く同心円状の穴を形成します。溶融した溶接金属は、トーチが加工対象物をトラバースするときにキーホールの後ろで凝固します。溶融池のシールドは、トーチオリフィスから放出されたイオン化プラズマガスによって提供され、補助供給源からのシールドガスで補充されます。PAW プロセスは、溶加金属添加の有無にかかわらず利用することができます。

PAW の収縮アークは GTAW に比べてより大きな溶融深さを可能にするので、約 0.125~0.3 インチ (3.2~7.6 mm) の厚さ範囲の Ni / Co 基材料の自生溶接 (すなわち、溶加金属を使用しない溶接) に対して潜在的に有利です。これに対して、典型的には、約 0.125 インチ (3.2 mm) より厚い材料の GTAW には溶加金属が必要です。I 型溶接継手は、厚さ約 0.3 インチ (7.6 mm) まで使用できます。PAW では広範囲の厚さの溶接が可能ですが、0.125~0.3 インチ (3.2~7.6 mm) の範囲外の厚さに対しては、通常は他の溶接方法でより良い結果が得られます。継手の厚さが 0.3 インチ (7.6 mm) を超える場合は、最初のパスに自生キーホール溶接を使用し、続いて溶加金属を用いた非キーホール (溶融) PAW を使用することができます。GTAW のような他の溶接方法は、2 回目以降のパスにも使用できます。



## プラズマアーク溶接(PAW) (続き)

PAW 溶接の電気極性は、直流電極負(DCEN / “直流極性”) でなければなりません。一貫したキーホール溶接を提供するためには、溶接電流、ガス流量、および運棒速度を適切にバランスさせる必要があります。不安定なキーホールは、溶融池に乱れを生じる可能性があります。アルゴンまたはアルゴン - 水素混合気は、通常、オリフィスガスおよびシールドガスとして使用されます。オリフィスガスは、浸透深さおよびプロファイルに強い影響を及ぼします。少量の水素(～5%)は、通常、自生キーホール溶接のためのアークエネルギーを増加させるのに十分であり、量が多いと、溶接金属にポロシティを生じる可能性があります。より厚い継手に対しては、キーホールを形成し始めるためにオリフィスガス流量を増やし、溶接電流をアップスロープさせる必要があるかも知れません。溶接の端部でキーホールキャビティを充填するために、オリフィスガス流量を減少させ、溶接電流をダウンスロープさせる必要があるかも知れません。キーホール溶接を行うためには、運棒速度が速くなるほど、より高い溶接電流が必要になります。過剰な運棒速度は、溶接止端部あるいは溶接ルート部近傍の母材が溶け込み、溶接金属で充填されないまま溝として残った、いわゆるアンダーカットを生じる可能性があります。溶接トーチは、加工対象物に対して縦方向および横方向の両方で本質的に垂直に保持し、溶接継手の中心線上にあるように保たなければなりません。この状態からわずかにずれても、溶接金属に不完全溶融の欠陥を生じる可能性があります

## 電子ビーム溶接 (EBW) および レーザー 溶接(LBW)

電子ビーム溶接(EBW)およびレーザー溶接(LBW)は、高エネルギー密度の溶接方法で、溶接熱入力が低い、溶接幅に対する溶接深さの比が大きい、熱影響領域(HAZ)が狭い、および歪みが少ないといった幾つかの利点を有しています。溶接継手に衝突し合体させるために、EBWは高速の収束した電子ビームの運動を利用し、LBWは高密度のコヒーレントなレーザービームからの熱を利用します。

従来のアーク溶接で接合することができるほとんどの Ni / Co 基合金は、EBW および LBW でも問題なく接合することができます。これらのビーム溶接プロセスは、アーク溶接することが困難な合金に対してより適しているだけでなく、アーク溶接に比べてより良好な全体的な溶接特性を提供することができると考えられます。溶接熱入力が少ないことにより、凝固温度範囲で費やされる時間がより短くなるとともに冷却速度が比較的速くなり、それによって溶接凝固中の第二相の析出が抑制されます。

# 電子ビーム溶接(EBW) および レーザー溶接(LBW) (続き)

溶接継手の準備と嵌め合いは、EBW および LBW プロセスにとって、特に重要です。ほとんどの場合、I型突合せ継手が用いられます。通常、溶加材は溶融池には追加されませんが、裸ワイヤを使用して追加することができます。EBW は、通常、大気汚染物質に対して優れた保護を提供するシールドガスを使用せずに、真空環境で実施する必要があります。LBW は、通常、溶融した溶融池の酸化を防止するために、アルゴンまたはヘリウムのシールドガスを用いて行われます。急速な凝固速度および溶存ガスが容易に脱離することができない深い溶融池のために、ポロシティが溶接性の問題となるかもしれません;この影響は、運棒速度を速くすると悪化します。ビームをウィーブさせることによる溶融池の振動または攪拌は、ガスが溶融池から逃げのを助けるために必要な時間を提供し、ポロシティを減少させます。HAZの“ネイルヘッド”領域における液化割れの感受性は、この領域の応力/歪み状態によって促進されます。より遅い運棒速度は、HAZ 内の温度勾配をより小さくし、液状割れの感受性を低減するのに有益です。

EBW の詳細については、AWS C7.1M/C7.1, Recommended Practices for Electron Beam Welding and Allied Processes. を参照してください。

LBW の詳細については、AWS C7.2M, Recommended Practices for Laser Beam Welding, Cutting, and Allied Processes. を参照してください。

## ろう付けおよびはんだ付け

### ろう付け

ろう付けとは、液相線が 840°F (450°C) 以上で母材の固相線より低い、すなわち、母材の溶融を伴わないろう材の存在下で、材料をろう付け温度に加熱することによって合体させる接合プロセスのグループを指します。液相線または融点は、金属または合金が完全に液体である最低温度であり、固相線は、金属または合金が完全に固体である最高温度です。ろう付けは、継手の密着した接合面の間にろう材を分配することによって特徴付けられます。熱を加えることにより、ろう材は毛細管作用によって流れ、溶融し、再凝固して接合部の表面間に冶金学的結合を形成します。炉中ろう付けは、Ni 基 / Co 基合金をろう付けする通常の方法で、特に高温ろう材が用いられる場合に使用されます。以下の情報は炉中ろう付けに焦点を当てたものです。

Ni 基/Co 基合金のろう付け成功の鍵は次の通りです:

- 母材金属表面の徹底的な洗浄と準備
- 目的とする用途に対する適切なろう材の選択
- ろう付けの際の適切な嵌め合いと、拘束がないこと
- ろう付け中の大気からの適切な保護
- 母材中に第二相が析出するのを避けるための最小の熱暴露

# ろう付けおよびはんだ付け(続き)

## 母材金属表面の準備

ろう付けする前に、埃、塗料、インク、化学的残留物、酸化物、スケールなどのあらゆる形態の汚染物質を部品表面から除去する必要があります。さもなければ、熔融したろう材は、“濡れ”にくく、母材金属の表面に沿って流れにくくなります。表面は、溶剤洗浄または脱脂、次いで機械的洗浄または酸洗いによって洗浄しなければなりません。頑強な表面酸化物およびスケールは研削で除去する必要があるかも知れません。一旦洗浄したら、その後の汚染を防止するために、きれいな手袋を使用してできるだけ早く部品を組み立てる必要があります。ろう付けする前には、ろう付けする表面だけでなく、組立部品全体を適切な洗浄技術を使用して洗浄するように注意することが重要です。

いくつかの耐熱合金、特に、アルミおよびチタン含有量がより多い合金は、ろう付け前に表面に薄いニッケルめっき層を設けるのが有効です。この層は、通常、電気めっきによって形成されます；ニッケル-リン合金を使用した無電解ニッケルめっきは推奨できません。特定の母材合金および特定の継手形状に応じて、通常、最大で約 0.001 インチ (0.025 mm) までのめっき層厚さが採用されます。

## ろう材の選定

目的とする用途に対するろう材の適切な選定は、部品の設計、母材合金、および使用環境を含む、多くの要因に依存します。ろう材は、通常、化学組成によって分類されます。HASTELLOY® および HAYNES® 合金は、様々なニッケル-、コバルト-、銀-、銅-、および金ベースのろう材を使用して成功裏にろう付けすることができます。使用できるろう材のいくつかを表4に記載します。ろう材の正確な合金含有量は、液相線と固相線との間の温度範囲、すなわち熔融温度範囲を決定します。熔融温度範囲の大きさは潜在的な充填能力を示し、より大きな熔融範囲を有するろう材は、一般により大きな継手間隙間を充填することができます。共晶ろうと呼ばれるろう材は、特定の温度で熔融します。その結果、共晶ろうは充填能力が低く、タイトな継手間隙が必要となります。共晶ろうの例は、AWS A5.8 に BAg-8、BAu-4、および BCu-1 として分類されています。

一般に、ろう材は、粉末を液体バインダーと混合して用いられます。また、ろう材粉末を水性ゲル懸濁剤と混合してペーストを作ることもできます。ろう材は、箔およびテープとしても利用できます。非接合面に飛散したろう材は、特に、ろう材の融点を超える使用温度に曝された場合、飛散した箇所耐環境性を著しく低下させる可能性があるため、ろう材を接合領域に閉じ込めるためにあらゆる努力をする必要があります。ほとんどのろう材は Ni 基の耐食合金と同程度の耐食性は有していないので、ろう付け接合部が腐食環境から隔離される場合にのみろう付けを用いることが好ましくなります。

# ろう付けおよびはんだ付け(続き)

## ろう材の選定(続き)

ニッケルベースのろう材は、2000°F(1093°C)までの高温で使用される用途に使用できます。これらのろう材には、一般に、溶融範囲を低下させて様々な温度でろう付けするために、ホウ素、ケイ素、およびマンガンが添加されています。ホウ素を含んだろう材は、高温およびストレス条件に曝される、航空宇宙およびその他の用途に使用されます。しかしながら、これらのろう材は、脆いホウ化物を形成しやすい傾向があります。また、これらのろう材は、クロムを含有させて、より耐酸化性のある継手にすることもできます。

コバルトベースのろう材は、Co 基合金との適合性を達成し、良好な高温強度および耐酸化性を得ることができる、有用な一般的なろう材です。

銀ベースのろう材は、約 400°F(204°C)以下で使用される用途向け Ni 基耐食合金のろう付けに成功裏に使用されています。これらのろう材は、優れた流動特性と使いやすさで知られています。亜鉛およびスズのような低温成分を含むろう材は、ろう付け温度に達する前に蒸発するので、炉中ろう付けが困難です。銀ベースのろう材を用いたほとんどの炉中ろう付けは、アルゴン雰囲気で行わなければなりません。ほとんどの Ni 基合金は、溶融した銀リッチな化合物に曝されると応力腐食割れが起こることがあるので、銀ベースのろう材を使用する場合は、ろう付け中に母材に応力がかからないように注意する必要があります。この液体金属脆化形態の亀裂は、ろう付け温度で破滅的に生じます。

銅ベースのろう材は、Ni 基合金と急速に合金化して液相線を上昇させ、流動性を低下させる傾向があります。したがって、できるだけ継手の近くに置き、接合する部品をろう付け温度まで急速に加熱する必要があります。銅ベースのろう材は、使用温度が 950°F(510°C)未満の部品を接合する場合にのみ推奨されます。かなりの量のリンを含む銅ベースのろう材は、脆性破壊を促進するリン化ニッケルを結合線に形成する傾向があるので、注意して使用しなければなりません。Co ベースのろう材は、Co 基合金のろう付けには使用してはなりません。

金ベースのろう材は、母材との相互作用が低いため、薄い母材を接合するとき主に使用されます。これらのろう材は、良好な継手部の延性および/または酸化および腐食に対する耐性が主な関心事である場合に有用です。

様々なろう材の詳細な分類は、アメリカ溶接協会のろう付用ろう材に対する規格: *AWS A5.8M/A5.8, Specification for Filler Metals for Brazing and Braze Welding* を参照してください。市販されている特許ろう材および合金化合物も数多く存在しています。特定の母材合金または用途のためのろう材を選択するときは、ろう材製造業者に相談することを推奨します。

# ろう付けおよびはんだ付け(続き)

## 嵌合および固定

ほとんどのろう付け合金は毛細管作用の力のもとに流れるので、ろう付けする部品の適切な嵌合が極めて重要です。接合領域を通る溶けたろう材の均一な流れを促進するためには、ろう付け温度において 0.001~0.005 インチ (0.025~0.125mm) オーダーの継手隙間を維持しなければなりません。ろう付け中にろう付け接合部に課される過度の外部応力またはひずみは、特にろう付けフラックスが関与する場合に割れを引き起こす可能性があります。可能であれば、部品はアニールした状態(すなわち、冷間加工していない状態)でろう付けしなければなりません。

接合部を適切に固定することも役に立ちます。炉中ろう付けに使用する固定具は、良好な寸法安定性があり、急速冷却を促進するために、一般には、熱質量が小さくなければなりません。金属製の固定具は、熱サイクルの繰り返しを通して厳しい公差を維持するには限度があり、比較的高い熱質量を有しています。したがって、グラファイトおよびセラミック製の固定具が、通常、高温炉中ろう付け用途での使用に適しています。グラファイトは、真空および不活性ガス炉中ろう付けに広く使用されており、優れた結果を提供します。しかしながら、グラファイトは、水素と反応してろう付けされる部品に浸炭を生じさせるので、適切な保護コーティングなしで水素炉中ろう付けの固定具に使用すべきではありません。セラミックも使用されていますが、一般的には、より小さな固定具用です。

## 保護雰囲気およびフラックス

ろう付け前の適切な洗浄手順に加えて、炉環境の制御およびろう付け雰囲気の純度は、ろう材の適切な流れ特性を保証するために非常に重要です。大部分の Ni 基 / Co 基合金は、強固な酸化皮膜を形成するように設計されているため、これらの酸化皮膜は、雰囲気が厳密に制御されなければ、ろう付けの際に問題を引き起こします。炉内の任意の供給源に由来する酸素が接合領域に表面汚染を生じさせる可能性があるため、炉環境からの酸素、酸化ガス種、および還元性の酸化化合物を排除することが必要です。例えば、Ni ベースのろう材は、真空中、高純度アルゴン中、または水素（還元）炉雰囲気中で、通常、使用されます。炉の内部および器具は、清浄で、いかなるタイプの還元性酸化堆積物も無いように維持し、外部からの大気の漏洩率は可能な限り低く保たなければなりません。真空炉への大気漏洩率が高いと、ろう付けされる母材金属表面に薄い酸化膜が容易に形成されます。表面酸化膜が存在すると、ろう材の流れが妨げられ、ろう付け接合が不良になることが多くなります。フラックスベースのろう付け作業は、誘導コイル加熱源を用いて、または還元雰囲気の炉内で行うことができます。

ろう付けフラックスは、母材金属表面を保護し、濡れを助けるために用いられます。フラックスは、通常、フッ化物とホウ酸塩の混合物で、ろう材の溶融温度以下で溶融します。標準的なろう付けフラックスは、ほとんどの Ni 基 / Co 基合金と一緒に使用することができます。特定のろう材またはアルミとチタンを含む母材合金と一緒に使用するには、特殊な配合が必要な場合があります。母材金属、ろう材、ろう付時間、継手設計など、最も適切なフラックスの選択に影響する多くの変数があります。効果的であるためには、ろう付けフラックスはろう付け温度範囲全体にわたって機能しなければなりません。特定のフラックスの使用を初めて検討する場合は、ろう付けフラックスの供給者からの推奨を求める必要があります。ろう付け後にフラックスを除去することが必要で、特にろう付けした部品が腐食性または高温環境で使用される場合には重要です。頑強なフラックス残渣を除去するには、研削または研磨ブラストが必要な場合があります。

# ろう付けおよびはんだ付け(続き)

## ろう付け熱サイクルの影響

ろう付けに伴う熱サイクルは、HAYNES® および HASTELLOY® 合金のマイクロ組織および特性に有害な影響を及ぼす可能性があります。ろう付け中の熱サイクルの暴露時間には、選択されたろう付け温度での時間と、加熱および昇温された温度からの冷却に要する時間の両方が含まれます。それぞれのろう付け熱サイクルが、成分中に有害な第二相の析出を生じないように注意する必要があります。したがって、ろう付け作業に伴う熱サイクルは、ほとんどの Ni 基 / Co 基合金が第二相を析出させる傾向がある大凡 1000~1800°F (538~982°C) の範囲の温度での暴露を最小限に抑えるように制御する必要があります。耐食合金の場合、このような第二相の析出は使用中の耐食性に強く影響します。ろう付け温度からの通常の冷却速度は、特に真空炉ろう付けでは、通常、ほとんどの Ni 基 / Co 基合金の炭化物析出を防止するには遅すぎます。炉をアルゴンまたはヘリウムで再充填することによって、真空環境における冷却速度を高めることができます。母材合金の溶体化温度範囲でろう付けを行う場合、使用性能に有害な、正常な結晶粒成長および異常な結晶粒成長の両方を生じる可能性があります。

表 4: HASTELLOY® および HAYNES® 合金に使用できる合金

呼称/規格			標準組成 (wt.%)	液相線 - 固相線	ろう付け温度範囲
AWS A5.8	ISO 17672	AMS			
BAG-1	Ag 345	4769	45Ag-15Cu-16Zn-24Cd	1125-1145°F (607-618°C)	1145-1400°F (620-760°C)
BAG-2	Ag 335	4768	35Ag-26Cu-21Zn-18Cd	1125-1295°F (607-702°C)	1295-1550°F (700-840°C)
BAG-3	Ag 351	4771	50Ag-15.5Cu-15.5Zn-16Cd-3Ni	1170-1270°F (632-688°C)	1270-1500°F (690-815°C)
BAG-4	Ag 440	----	40Ag-30Cu-28Zn-2Ni	1240-1435°F (671-779°C)	1435-1650°F (780-900°C)
BAG-8	Ag 272	----	72Ag-28Cu	1435°F (779°C)	1435-1650°F (780-900°C)
BAU-4	Au 827	4787	Au-18Ni	1740°F (949°C)	1740-1840°F (950-1005°C)
BAU-5	Au 300	4785	Au-36Ni-34Pd	2075-2130°F (1135-1166°C)	2130-2250°F (1165-1230°C)
BAU-6	Au 700	4786	Au-22Ni-8Pd	1845-1915°F (1007-1046°C)	1915-2050°F (1045-1120°C)
BCU-1	Cu 141	----	Cu-0.075P-0.02Pb	1981°F (1083°C)	2000-2100°F (1095-1150°C)
BNi-1	Ni 600	4775	Ni-14Cr-3.1B-4.5Si-4.5Fe-0.75C	1790-1900°F (977-1038°C)	1950-2200°F (1065-1205°C)
BNi-1a	Ni 610	4776	Ni-14Cr-3.1B-4.5Si-4.5Fe-0.06C	1790-1970°F (977-1077°C)	1970-2200°F (1080-1205°C)
BNi-2	Ni 620	4777	Ni-7Cr-3.1B-4.5Si-3Fe-0.06C	1780-1830°F (971-999°C)	1850-2150°F (1010-1180°C)
BNi-3	Ni 630	4778	Ni-3.1B-4.5Si-0.5Fe-0.06C	1800-1900°F (982-1038°C)	1850-2150°F (1010-1180°C)
BNi-4	Ni 631	4779	Ni-1.9B-3.5Si-1.5Fe-0.06C	1800-1950°F (982-1066°C)	1850-2150°F (1010-1180°C)
BNi-5	Ni 650	4782	Ni-19Cr-0.03B-10.1Si-0.06C	1975-2075°F (1079-1135°C)	2100-2200°F (1150-1205°C)
BNi-6	Ni 700	----	Ni-11P-0.06C	1610°F (877°C)	1700-2000°F (930-1095°C)
BNi-7	Ni 710	----	Ni-14Cr-0.02B-0.1Si-0.2Fe-0.06C-10P	1630°F (888°C)	1700-2000°F (930-1095°C)
BCO-1	Co 1	4783	Co-19Cr-17Ni-0.8B-8Si-1Fe-4W-0.4C	2050-2100°F (1120-1149°C)	2100-2250°F (1150-1230°C)

# ろう付けおよびはんだ付け(続き)

## はんだ付け

はんだ付けとは、液相線が 840°F(450°C)未満で母材の固相線よりも低い溶加材の存在下で、材料をはんだ付け温度に加熱することによって、すなわち、母材金属の溶融を伴わずに、材料を合体させる接合プロセスのグループを指します。高レベルのクロム、アルミおよびチタンを含む合金は、はんだ付けがより難しくなる可能性があります。Ni 基 / Co 基合金は、良好にはんだ付けすることができます。はんだ付けに関する多くの考慮事項は、HASTELLOY® および HAYNES® 合金のろう付けに対して先に概説されたものと同様です。

一般的なはんだ溶加材は、鉛とスズの混合物から構成されています。一般的なタイプの溶加材のほとんどは、Ni 基 / Co 基合金のはんだ付けに使用できます。組成が、スズ; 60 wt.% - 鉛; 40 wt.%、あるいはスズ; 50 wt.% - 鉛; 50 wt.% のような、比較的高いスズ含有量を有する溶加材は、最高の濡れ性を提供します。色を一致させることが優先事項である場合は、スズ; 95 wt.% - アンチモン; 5 wt.% のような組成の特定の溶加材が最高かもしれません。しかしながら、高温に曝されると、はんだ接合部は、やがては酸化して目立つようになるかも知れません

はんだ溶加材は、継手のシールに使用することはできますが、機械的に強い継手を提供したり、構造的な荷重を伝達することは期待できません。ハゼカシメ、リベット接合、スポット溶接、またはボルト結合などの別の補強手段によって、機械的強度を提供する必要があります。析出強化型合金に対しては、合金が時効硬化処理された後にはんだ付けを行う必要があります。はんだ付けに伴う比較的低い温度は、析出強化型合金を軟化または弱化させたりはしません。いかなる溶接、ろう付け、あるいは他の加熱処理作業も、はんだ付けの前に行わなければなりません。Ni 基 / Co 基合金は、低融点の鉛や他の金属と接触すると、液体金属脆化を起こしやすくなります。これは通常のはんだ温度では発生しませんが、はんだ付けされた継手の過熱は避けるべきです。

塩酸を含むフラックスは、通常、クロムを含むほとんどの Ni 基 / Co 基合金のはんだ付けに必要です。ロジンベースのフラックスは、一般的に効果がありません。ほとんどのフラックス残留物は水分を吸収し、腐食性が高くなる可能性があるため、はんだ付け後に加工対象物から完全に除去する必要があります。水またはアルカリ性水溶液中でのすすぎは、ほとんどの残留物を除去するのに有効です; しかしながら、油またはグリースが存在する場合は、すすぎの前に脱脂する必要があります。

長い重ね継手のような、はんだ付け後に洗浄することができない継手デザインは、組み立てる前に、はんだ溶加材でコーティングする必要があります。このコーティングは、一般に、はんだ付けに使用されるのと同じ溶加材合金で行われます。加工対象物をはんだ溶加材の溶融浴中に浸漬してもよく、あるいは表面をフラックスでコーティングし、はんだ溶加材が継手をコーティングするように加熱することもできます。スズめっきでプレコーティングすることもできます。

はんだ付けされた継手の品質を評価するには、目視検査で十分です。はんだ付けされた金属は滑らかで連続的でなければなりません; 塊または他の視覚的不連続性は、熱が不十分であることを示しています。穴は汚染または過熱によって生じた可能性が高く、漏れが発生する可能性があります。気密性を要求されるはんだ付け継手は、圧力テストを実施しなければなりません。



# 熱処理

下記の合金に適用できる推奨手順および温度:

耐食合金

耐熱合金

耐摩耗・耐食合金

HAYNES® および HASTELLOY® 合金の熱処理は非常に重要な問題です。これらの鍛錬用材料の製造においては、最適な特性、特に延性を回復させるために、中間熱処理が必要な多くの熱間および冷間圧延工程があります。耐食合金の場合、これらの中間熱処理は、一般に溶体化処理です。耐熱合金の場合は、必ずしもそのようにする必要はありません。

材料が最終サイズに達すると、仕上げアニールが行われます。これは通常、溶体化処理です；しかしながら、2～3の耐熱合金 (HTA) は、結晶粒サイズ、またはいくつかの他のマイクロ組織的特徴を制御するために、調整された温度で、仕上げアニールされます。

その後の、これらの供給された状態の材料の加工には、この手引書の熱間加工および冷間加工のセクションで論じられているように、もう一度、熱間加工または冷間加工を組み込むことができます。この場合も、作業には延性を回復させるための中間アニール (通常はCRA材料に対する溶体化処理) を伴う工程が含しばしば含まれます。それを終わると、加工された部品は、使用前に最適な特性を回復させるため、または (時効硬化型合金の場合は) 時効硬化の準備をするために仕上げアニール (通常、CRA材料に対しては溶体化処理) が必要になります。

## 熱処理(続き)

下記の合金に適用できます:

### 耐食合金

耐食性合金(CRA)の組成は、ニッケル基、クロムおよび/またはモリブデン(場合によってはタングステンで部分的に置換されている)の副次的な添加元素、(特定の媒体に対する耐性を高めるため)の銅および(より安価な原材料の使用を可能にするため)の鉄のような少量の添加元素、ならびに溶融中に酸素および硫黄のような有害な成分を除去するのに役立つアルミおよびマンガンのような少量の添加元素から成っています。供給された状態では、それらは一般に単相(面心立方体またはガンマ相)の圧延マイクロ組織を示します。

ほとんどの場合、供給状態の(CRA)材料に単相マイクロ組織が存在するのは、高温組織を”固定する”ために施された、高温での溶体化処理、それに続く急冷(急速冷却)によるものです。ゆっくり冷却すると、これらの合金のほとんどは、合金化添加元素の合計含有量が溶解限度を超えるという事実のために、一般的に組織の結晶粒界内に(少量ではありますが)第2相を含むようになります。

これは、洗練された溶解技術および手順にもかかわらず、痕跡量の炭素およびケイ素のような望ましくない元素(溶解度が非常に低い)が存在し得るという事実によって悪化します。幸いにも、溶体化処理、その後の急冷(水または冷ガスによる)は、この問題も解決します。

耐食合金は、通常、溶体化処理した状態で供給され、それらの通常の溶体化温度は、以下の表に示されています。表に示されている温度においては、ガンマ相以外の相(および、まれには一次炭化物および/または窒化物)は溶解しますが、良好な機械的特性を付与することが知られている範囲内の結晶粒径が得られます。C-4合金では、チタンの存在により、一次炭化物および/または窒化物が見られます。

耐食合金(CRA)の場合、溶体化処理と:ミルアニール(MA)という用語は一般に同義語です。しかしながら、(薄板製造における)連続式水素アニーリング炉に使用される温度は、ライン速度(従って、その温度での暴露時間)を補償するように調整されています。

## 熱処理(続き)

### 耐食合金 (CRA)の溶体化処理温度

合金	溶体化処理温度*		急冷のタイプ
	°F	°C	
<b>B-3®</b>	1950	1066	WQ or RAC
<b>C-4</b>	1950	1066	WQ or RAC
<b>C-22®</b>	2050	1121	WQ or RAC
<b>C-22HS®</b>	1975	1079	WQ or RAC
<b>C-276</b>	2050	1121	WQ or RAC
<b>C-2000®</b>	2100	1149	WQ or RAC
<b>G-30®</b>	2150	1177	WQ or RAC
<b>G-35®</b>	2050	1121	WQ or RAC
<b>HYBRID-BC1®</b>	2100	1149	WQ or RAC

\*± 25° F (14° C)

WQ = 水冷 (推奨); RAC = 急速空冷

さまざまなモードの負荷の上げ下ろし、運転を行う多くのタイプの炉があるため、耐食合金 (CRA) を加熱し、その後のアニールに必要な時間に関する特別な規則はありません。一般的なガイドラインがあるだけです。

アニーリングする加工物の温度は、取付けた熱電対で測定し、アニーリング時間の記録は、加工物の全断面が推奨アニーリング温度に達したときに開始する必要があります。断面の中心は、アニーリング温度に到達するまでに表面よりも時間がかかることを覚えておく必要があります。

## 熱処理(続き)

時間に関する一般的なガイドラインは以下の通りです:

通常、加工物全体がアニーリング温度に到達した後は、アニーリング時間は、断面の厚さに応じて10～30分の間でなければなりません。薄板部品に対しては、この範囲内のより短い時間を用いなければなりません。断面が厚い(重い)場合は、より長い時間を使用する必要があります。アニーリング後の急速冷却は、マイクロ組織中の特に結晶粒界において、致命的な第2相析出物の核形成および成長を防ぐために必須です。水冷が好ましく、3/8 in(9.5 mm)より厚い材料に強くお勧めします。断面が薄い場合には、急速空冷が使用されています。炉からの取り出しから急冷の開始までの時間は、できるだけ短く(そして確実に3分未満で)なければなりません。

B-3<sup>®</sup>合金には特別な注意事項が必要です。他のニッケル - モリブデン合金(特にその前身であるB-2<sup>®</sup>合金)よりも安定していますが、特に冷間加工を施された後は、1100-1500°F(593-816°C)の温度範囲で重大で有害なマイクロ組織の変化が、まだ起こりやすい状態にあります。したがって、B-3<sup>®</sup>合金は、この範囲内の温度に、いかなる長さの時間も曝されることがないように注意を払わなければなりません。B-3<sup>®</sup>合金は、アニーリング温度(1950°F / 1066°C)に予熱された炉でアニールする必要があります。使用する炉は、B-3<sup>®</sup>合金の加工物を装填した後の温度を急速に回復させるのに十分な熱容量を備えていなければなりません。

ニッケル - モリブデン(B-タイプ)合金における(アニーリング温度への加熱中に起こり得る)これらのマイクロ組織変化に関連する潜在的な問題の1つは、冷間加工した材料中の残留応力による割れです。残留引張応力を低減させるために、冷間成形されたヘッドの隅の丸み部および直線フランジ領域へショットピーニングすることは、このような問題を回避する上で非常に有益であることが判明しています。

## 熱処理(続き)

下記の合金に適用できます:

### 耐熱合金

ニッケル、コバルト、またはニッケル、コバルトおよび鉄の混合物を基材とする耐熱合金(HTA)は、組成的にはるかに複雑です。しかしながら、CRA合金の場合と同様に、クロムは重要な合金元素であり、表面保護膜(特に高温ガス中の酸化物)の形成を可能にします。

モリブデンおよびタングステンのような大きな原子は、多くの耐熱合金に固溶強度を付与するために使用されます。強度を高めるために時効硬化に頼っているこれらの合金は、かなりの量のアルミ、チタンおよびニオブ(コロンビウムとも呼ばれ、非常に有効な強化物として知られている第2相("ガンマプライム"および"ダブルガンマプライム")の非常に微細な析出物を形成することができる)を含んでいます。

アルミは耐熱合金において別の役割を果たすことができ、保護膜(特に高温で、酸化物などの存在下で、これらの材料の表面上に形成される酸化物)を改造します。実際、酸化アルミニウムは非常に粘着性があり、安定しており、保護作用があります。

炭素が一般的に負の作用物質であるCRA材料とは異なり、HAYNES® および HASTELLOY® 耐熱合金(HTA)は、意図的な炭素添加、または、それよりもマイクロ組織中に誘導される炭化物に依存しており、高温用途に対して必要なレベルの強度(特にクリープ強度)を提供します。ある場合には、これらの炭化物は、材料の凝固中に形成されます(一次炭化物)。他の場合には、高温暴露中に固体状態で形成されます(二次炭化物)。

HTA材料中の特定の炭化物タイプおよび形態に対する必要性の結果として、アニーリングは、特に製造および加工プロセスのステップ間において、はるかに複雑な課題です。

## 熱処理(続き)

HAYNES® および HASTELLOY® 耐熱合金は、通常、下記の温度(または、指定された温度範囲)で溶体化処理した状態で供給されます。:

### 耐熱合金(HTA)の溶体化処理温度

合金	溶体化処理温度/範囲		急冷のタイプ
	°F	°C	
<b>25</b>	2150-2250	1177-1232	WQ or RAC
<b>75</b>	1925*	1052*	WQ or RAC
<b>188</b>	2125-2175	1163-1191	WQ or RAC
<b>214®</b>	2000	1093	WQ or RAC
<b>230®</b>	2125-2275	1163-1246	WQ or RAC
<b>242®</b>	1900-2050	1038-1121	WQ or RAC
<b>244™</b>	2000-2100	1093-1149	WQ or RAC
<b>263</b>	2100 + 25	1149 + 14	WQ or RAC
<b>282®</b>	2050-2100	1121-1149	WQ or RAC
<b>556®</b>	2125-2175	1163-1191	WQ or RAC
<b>625</b>	2000-2200	1093-1204	WQ or RAC
<b>718</b>	1700-1850**	927-1010**	WQ or RAC
<b>HR-120®</b>	2150-2250	1177-1232	WQ or RAC
<b>HR-160®</b>	2025-2075	1107-1135	WQ or RAC
<b>HR-224®</b>	-	-	WQ or RAC
<b>HR-235™</b>	2075-2125	1135-1163	WQ or RAC
<b>MULTIMET®</b>	2150	1177	WQ or RAC
<b>N</b>	2150	1177	WQ or RAC
<b>R-41</b>	2050	1121	WQ or RAC
<b>S</b>	1925-2075	1052-1135	WQ or RAC
<b>W</b>	2165	1185	WQ or RAC
<b>WASPALLOY</b>	1975	1079	WQ or RAC
<b>X</b>	2125-2175	1163-1191	WQ or RAC
<b>X-750</b>	1900*	1038*	WQ or RAC

WQ = 水冷(推奨); RAC = 急速空冷

\*ブライト(水素)アニーリング温度

\*\*厳密な溶体化処理温度ではない(多くの予備のアニーリング温度範囲がある)

## 熱処理(続き)

溶体化処理した状態では、耐熱合金(HTA)のマイクロ組織は、一般に、本質的に清浄な(析出物を含まない)結晶粒界を有する 相(面心立方体)マトリックス中に分散した一次炭化物から成ります。固溶強化型合金の場合、これは通常、高温での使用と室温での加工性の両方にとって最適条件です。

HAYNES® および HASTELLOY® 合金は、鋼およびステンレス鋼に使用されるような類の温度で応力除去処理を施すべきではありませんが、望ましくない第2相の析出(特に合金の結晶粒界における)を生じるおそれがあるため、耐熱合金(HTA)には、工程間において加工途中の加工物の延性を回復させるために、やや低いアニーリング温度が使用されてきました。これらのいわゆる中間アニーリング温度は、前述の粒界析出を生じる可能性があるため慎重に使用すべきです。以下の表に、(選択された固溶強化型HTA材料に対する)いくつかの中間アニーリング温度の最低値を示します:

最低中間アニーリング温度(HTA)

合金	最低中間アニーリング温度	
	°F	°C
25	2050	1121
188	2050	1121
230®	2050	1121
556®	1900	1038
625	1700	927
HR-120®	1950	1066
HR-160®	1950	1066
S	1750	954
X	1850	1010

工程のステップ間での中間アニーリング温度が(むしろ溶体化処理温度よりも)適切かどうかは、合金およびマイクロ組織に及ぼすより低い温度の影響、および以降の作業の性質に依存します。これらの問題は、注意深く研究されなければならない、アドバイスが求められます。

## 熱処理(続き)

### 冷間(または温間)成型中のアニーリング

下記の合金に適用できます:

#### 耐熱合金

熱処理に対する HAYNES® および HASTELLOY® 耐熱合金(HTA)の反応は、処理前の材料の状態に大きく依存します。材料が冷間加工または温間加工されていない状態である場合、主要な反応は、通常、二次炭化物相の量および形態の変化です。その他の軽微な影響が生じることもあります。 (その前に冷間または熱間加工がない場合は) 結晶構造は通常、同じままです。

これらの合金を冷間または温間加工に供した場合、溶体化または中間アニールの適用は、ほとんど全ての場合に結晶構造を変えます。さらに、その前の冷間または温間加工の量は、結晶構造、ひいては材料の機械的特性に著しく影響します。

次の表は、様々なレベルの冷間加工を施した、いくつかの耐熱合金薄板の結晶粒径に及ぼす熱処理温度(5分間の持続時間)の影響を示しています。



# 熱処理(続き)

## 結晶粒径に対する冷間加工および熱処理温度の影響

冷間加工率	熱処理温度		ASTM 結晶粒度			
	°F	°C	25	230 <sup>®</sup>	556 <sup>®</sup>	X
0	None		3.5-4	5-6	5-6	4-5
10	1850	1010	NA	NA	NR	NR
	1950	1066	NR	NR	NR	NR
	2050	1121	NR	NFR	5-5.5	5-7
	2150	1177	4-4.5	4-7	5-5.5	NA
	2250	1232	3-4.5	6.5-7	NA	NA
15	1950	1066	7	NA	NA	NA
	2050	1121	6-7	NA	NA	NA
	2150	1177	5-7	NA	NA	NA
	2250	1232	3-4.5	NA	NA	NA
20	1850	1010	NA	NA	NR	NFR
	1950	1066	7-8	NFR	NR	NFR
	2050	1121	7-8	8-8.5	7.5-8.5	7-8
	2150	1177	4.5-7	7.5-8	6-6.5	NA
	2250	1232	2.5-4.5	7-7.5	NA	NA
25	1950	1066	7.5-8	NA	NA	NA
	2050	1121	7.5-8	NA	NA	NA
	2150	1177	4	NA	NA	NA
	2250	1232	3.5	NA	NA	NA
30	1850	1010	NA	NA	NFR	NFR
	1950	1066	NA	8-9	7.5-9.5	8-10
	2050	1121	NA	9-10	7-7.5	7.5-9.5
	2150	1177	NA	8.5-9	4.5-6.5	NA
	2250	1232	NA	6-7	NA	NA
40	1850	1010	NA	NA	7.5-9.5	8-9
	1950	1066	NA	9.5-10	8-9.5	8-10
	2050	1121	NA	9-10	7-9	9.5-10
	2150	1177	NA	8.5-9	4.5-6.5	NA
	2250	1232	NA	4-7	NA	NA
50	1850	1010	NA	NA	9-10	8.5-10
	1950	1066	NA	9-10	8.5-10	8.5-10
	2050	1121	NA	9-10	8-9.5	8.5-10
	2150	1177	NA	9-9.5	5.5-6	NA
	2250	1232	NA	5.5-6.5	NA	NA

NA=データなし

NR= 再結晶化は観察されず

NFR=完全に再結晶化されず

## 熱処理(続き)

いくつかの固溶強化型 HAYNES® および HASTELLOY® 耐熱合金の機械的特性に対する、冷間加工に種々の温度での熱処理を加えた影響を以下の表および図に示します。

HAYNES® 25 薄板の室温機械的特性に対する冷間加工と熱処理温度の影響

冷間加工率	熱処理* 温度		0.2% 耐力		極限引張り強さ		伸び	硬度
	%	°F	°C	ksi	MPa	ksi		
冷間加工なし	熱処理なし		68	469	144	993	58	24
10	熱処理なし		124	855	182	1255	37	36
15	熱処理なし		149	1027	178	1227	28	40
20	熱処理なし		151	1041	193	1331	18	42
25	熱処理なし		184	1269	232	1600	15	44
10	1950	1066	98	676	163	1124	39	32
15	1950	1066	91	627	167	1151	44	30
20	1950	1066	96	662	171	1179	41	32
25	1950	1066	89	614	169	1165	44	32
10	2050	1121	74	510	157	1082	53	27
15	2050	1121	79	545	161	1110	52	28
20	2050	1121	82	565	165	1138	48	31
25	2050	1121	83	572	166	1145	48	30
10	2150	1177	67	462	148	1020	63	21
15	2150	1177	74	510	156	1076	55	26
20	2150	1177	72	496	154	1062	59	26
25	2150	1177	69	476	149	1027	62	25
10	2250	1232	69	476	144	993	64	95
15	2250	1232	64	441	142	979	68	97
20	2250	1232	62	427	135	931	69	97
25	2250	1232	61	421	138	951	70	96

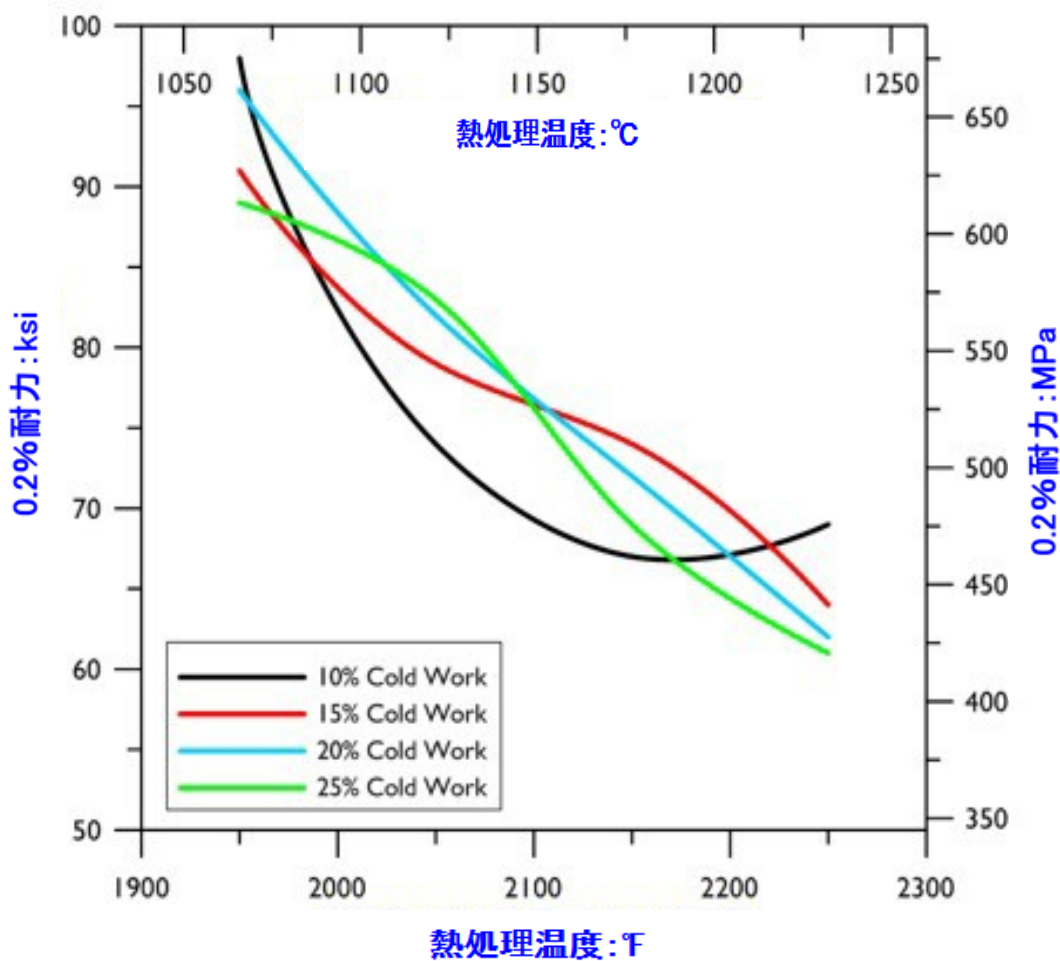
\*5 分間保持 + 急速空冷

引張り試験結果は、2又はそれ以上の試験の平均

HRC= ロックウェル硬さ "C" スケール

# 熱処理(続き)

冷間加工した HAYNES® 25 薄板に対する  
室温引張り強さ vs. 熱処理温度



# 熱処理(続き)

## HAYNES® 188 薄板の室温機械的特性に対する冷間加工と熱処理の影響

冷間加工率	熱処理* 温度		0.2% 耐力		極限引張り強さ		伸び	硬度
	%	°F	°C	ksi	MPa	ksi		
冷間加工なし	熱処理なし		67	462	137	945	54	98 HRB
10	熱処理なし		106	731	151	1041	45	32 HRC
20	熱処理なし		133	917	166	1145	28	37 HRC
30	熱処理なし		167	1151	195	1344	13	41 HRC
40	熱処理なし		177	1220	215	1482	10	44 HRC
10	1950	1066	91	627	149	1027	41	30 HRC
20	1950	1066	88	607	153	1055	41	28 HRC
30	1950	1066	84	579	158	1089	41	30 HRC
40	1950	1066	91	627	163	1124	40	31 HRC
10	2050	1121	65	448	143	986	50	22 HRC
20	2050	1121	71	490	149	1027	47	25 HRC
30	2050	1121	80	552	155	1069	44	28 HRC
40	2050	1121	87	600	159	1096	43	30 HRC
10	2150	1177	62	427	140	965	55	96 HRB
20	2150	1177	65	448	141	972	53	97 HRB
30	2150	1177	67	462	143	986	52	99 HRB
40	2150	1177	64	441	141	972	56	97 HRB
10	2250	1232	59	407	132	910	59	95 HRB
20	2250	1232	58	400	130	896	63	94 HRB
30	2250	1232	58	400	131	903	63	93 HRB
40	2250	1232	58	400	132	910	62	93 HRB

\*5 分間保持 + 急速空冷

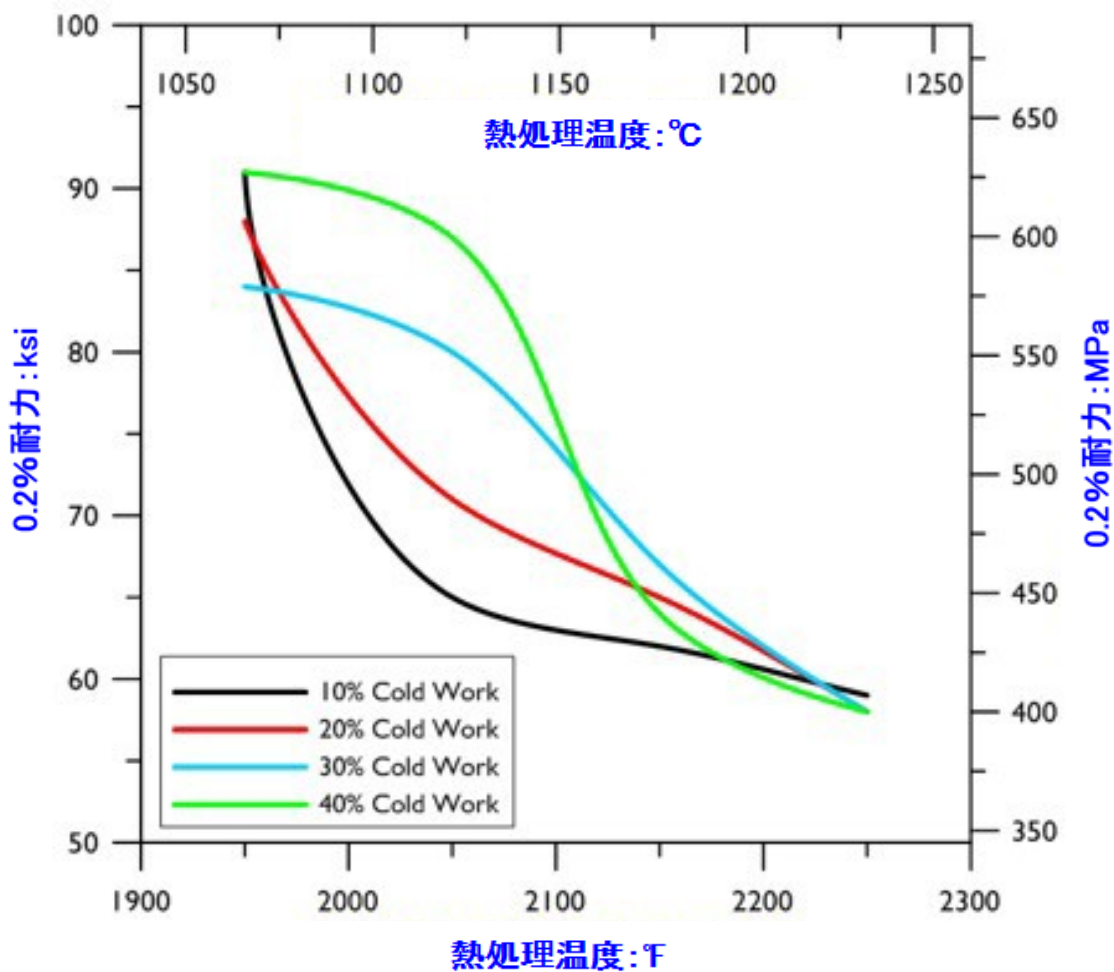
引張り試験結果は、2又はそれ以上の試験の平均

HRB= ロックウェル硬さ "B"スケール

HRC= ロックウェル硬さ "C"スケール

# 熱処理(続き)

冷間加工した HAYNES® 188 薄板に対する  
室温引張り強さ vs. 熱処理温度



# 熱処理(続き)

## HAYNES® 230® 薄板の室温機械的特性に対する冷間加工と熱処理温度の影響

冷間加工率	熱処理* 温度		0.2% 耐力		極限引張り強さ		伸び	硬度
	%	°F	°C	ksi	MPa	ksi		
冷間加工なし	熱処理なし		62	427	128	883	47	95 HRB
10	熱処理なし		104	717	145	1000	32	28 HRC
20	熱処理なし		133	917	164	1131	17	35 HRC
30	熱処理なし		160	1103	188	1296	10	39 HRC
40	熱処理なし		172	1186	202	1393	8	40 HRC
50	熱処理なし		185	1276	215	1482	6	42 HRC
10	1950	1066	92	634	144	993	33	24 HRC
20	1950	1066	81	558	142	979	36	26 HRC
30	1950	1066	76	524	142	979	36	99 HRB
40	1950	1066	81	558	146	1007	32	23 HRC
50	1950	1066	86	593	148	1020	35	24 HRC
10	2050	1121	81	558	139	958	37	98 HRB
20	2050	1121	65	448	136	938	39	97 HRB
30	2050	1121	72	496	140	965	38	99 HRB
40	2050	1121	76	524	142	979	36	99 HRB
50	2050	1121	81	558	144	993	36	23 HRC
10	2150	1177	56	386	130	896	44	92 HRB
20	2150	1177	64	441	134	924	40	96 HRB
30	2150	1177	70	483	138	951	39	98 HRB
40	2150	1177	73	503	139	958	38	98 HRB
50	2150	1177	72	496	138	951	39	98 HRB
10	2250	1232	52	359	125	862	47	92 HRB
20	2250	1232	57	393	128	883	45	92 HRB
30	2250	1232	54	372	126	869	48	92 HRB
40	2250	1232	53	365	126	869	47	91 HRB
50	2250	1232	55	379	128	883	46	89 HRB

\*5 分間保持 + 急速空冷

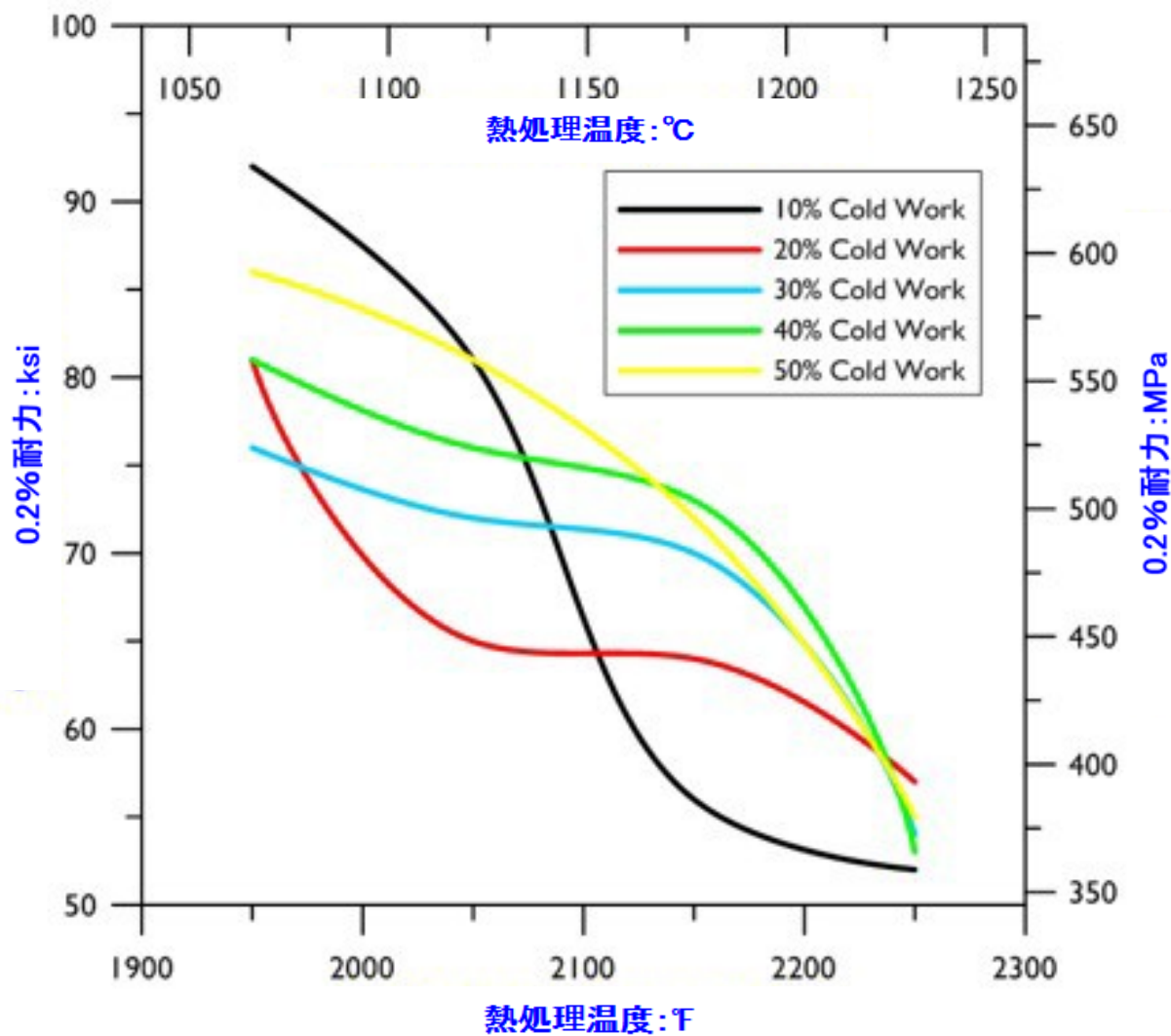
引張り試験結果は、2又はそれ以上の試験の平均

HRB= ロックウェル硬さ "B"スケール

HRC= ロックウェル硬さ "C"スケール

# 熱処理(続き)

冷間加工した HAYNES<sup>®</sup> 230<sup>®</sup> 薄板に対する  
室温引張り強さ vs. 熱処理温度



# 熱処理(続き)

## HAYNES® 625 薄板の室温機械的特性に対する冷間加工と熱処理温度の影響

冷間加工率	熱処理* 温度		0.2% 耐力		極限引張り強さ		伸び	硬度
	%	°F	°C	ksi	MPa	ksi		
冷間加工なし	熱処理なし		70	483	133	917	46	97 HRB
10	熱処理なし		113	779	151	1041	30	32 HRC
20	熱処理なし		140	965	169	1165	16	37 HRC
30	熱処理なし		162	1117	191	1317	11	40 HRC
40	熱処理なし		178	1227	209	1441	8	42 HRC
50	熱処理なし		184	1269	223	1538	5	45 HRC
10	1850	1010	63	434	134	924	46	NA
20	1850	1010	71	490	138	951	44	NA
30	1850	1010	78	538	141	972	44	NA
40	1850	1010	82	565	141	972	42	NA
50	1850	1010	82	565	141	972	42	NA
10	1950	1066	61	421	133	917	46	NA
20	1950	1066	71	490	137	945	45	NA
30	1950	1066	77	531	140	965	44	NA
40	1950	1066	83	572	142	979	42	NA
50	1950	1066	82	565	141	972	42	NA
10	2050	1121	58	400	128	883	50	NA
20	2050	1121	67	462	135	931	46	NA
30	2050	1121	58	400	127	876	52	NA
40	2050	1121	72	496	137	945	44	NA
50	2050	1121	61	421	130	896	50	NA
10	2150	1177	52	359	122	841	55	NA
20	2150	1177	54	372	124	855	55	NA
30	2150	1177	53	365	122	841	56	NA
40	2150	1177	52	359	122	841	55	NA
50	2150	1177	51	352	119	820	58	NA

\*5 分間保持 + 急速空冷

引張り試験結果は、2又はそれ以上の試験の平均

NA=データなし

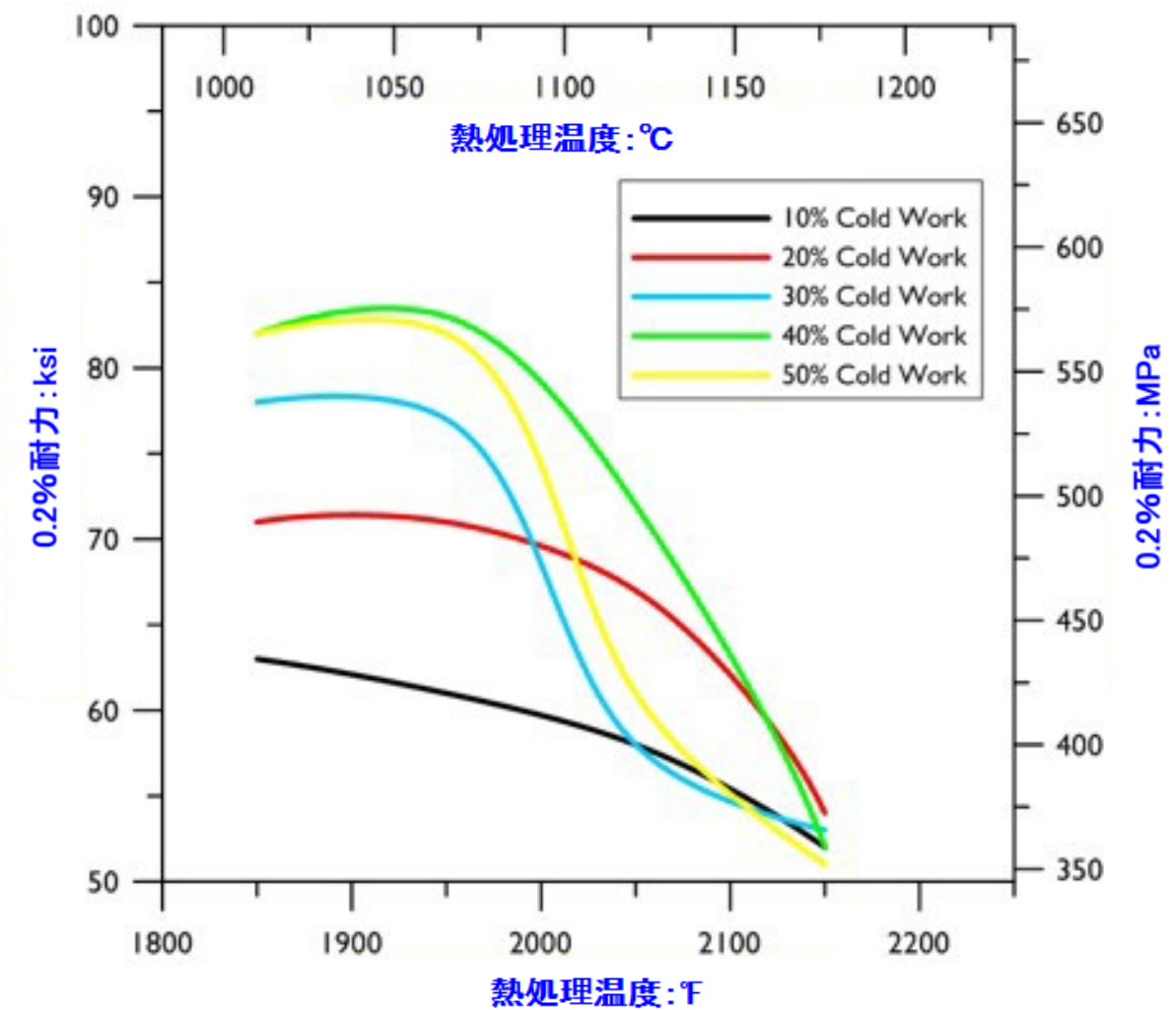
HRB= ロックウェル硬さ "B"スケール

HRC= ロックウェル硬さ "C"スケール



# 熱処理(続き)

冷間加工したHAYNES® 625 薄板に対する  
室温引張り強さ vs. 熱処理温度



# 熱処理(続き)

## HAYNES® HR-120® 薄板の室温機械的特性に対する冷間加工と熱処理温度の影響

冷間加工率	熱処理* 温度		0.2% 耐力		極限引張り強さ		伸び	硬度
	%	°F	°C	ksi	MPa	ksi		
冷間加工なし	熱処理なし		60	414	113	779	39	93 HRB
10	熱処理なし		103	710	126	869	26	27 HRC
20	熱処理なし		129	889	144	993	11	32 HRC
30	熱処理なし		143	986	157	1082	6	34 HRC
40	熱処理なし		159	1096	179	1234	6	35 HRC
50	熱処理なし		166	1145	186	1282	5	36 HRC
10	1950	1066	52	359	109	752	38	89 HRB
20	1950	1066	55	379	111	765	38	92 HRB
30	1950	1066	60	414	115	793	38	93 HRB
40	1950	1066	65	448	117	807	37	93 HRB
50	1950	1066	67	462	118	814	34	93 HRB
10	2050	1121	49	338	108	745	47	88 HRB
20	2050	1121	53	365	117	807	41	90 HRB
30	2050	1121	55	379	112	772	40	91 HRB
40	2050	1121	58	400	114	786	37	91 HRB
50	2050	1121	59	407	114	786	37	89 HRB
10	2150	1177	49	338	109	752	43	86 HRB
20	2150	1177	50	345	109	752	42	87 HRB
30	2150	1177	51	352	110	758	43	88 HRB
40	2150	1177	50	345	111	765	38	86 HRB
50	2150	1177	50	345	110	758	39	82 HRB
10	2250	1232	46	317	106	731	46	84 HRB
20	2250	1232	44	303	104	717	47	80 HRB
30	2250	1232	44	303	103	710	48	80 HRB
40	2250	1232	44	303	104	717	45	81 HRB
50	2250	1232	44	303	104	717	43	83 HRB

\*5 分間保持 + 急速空冷

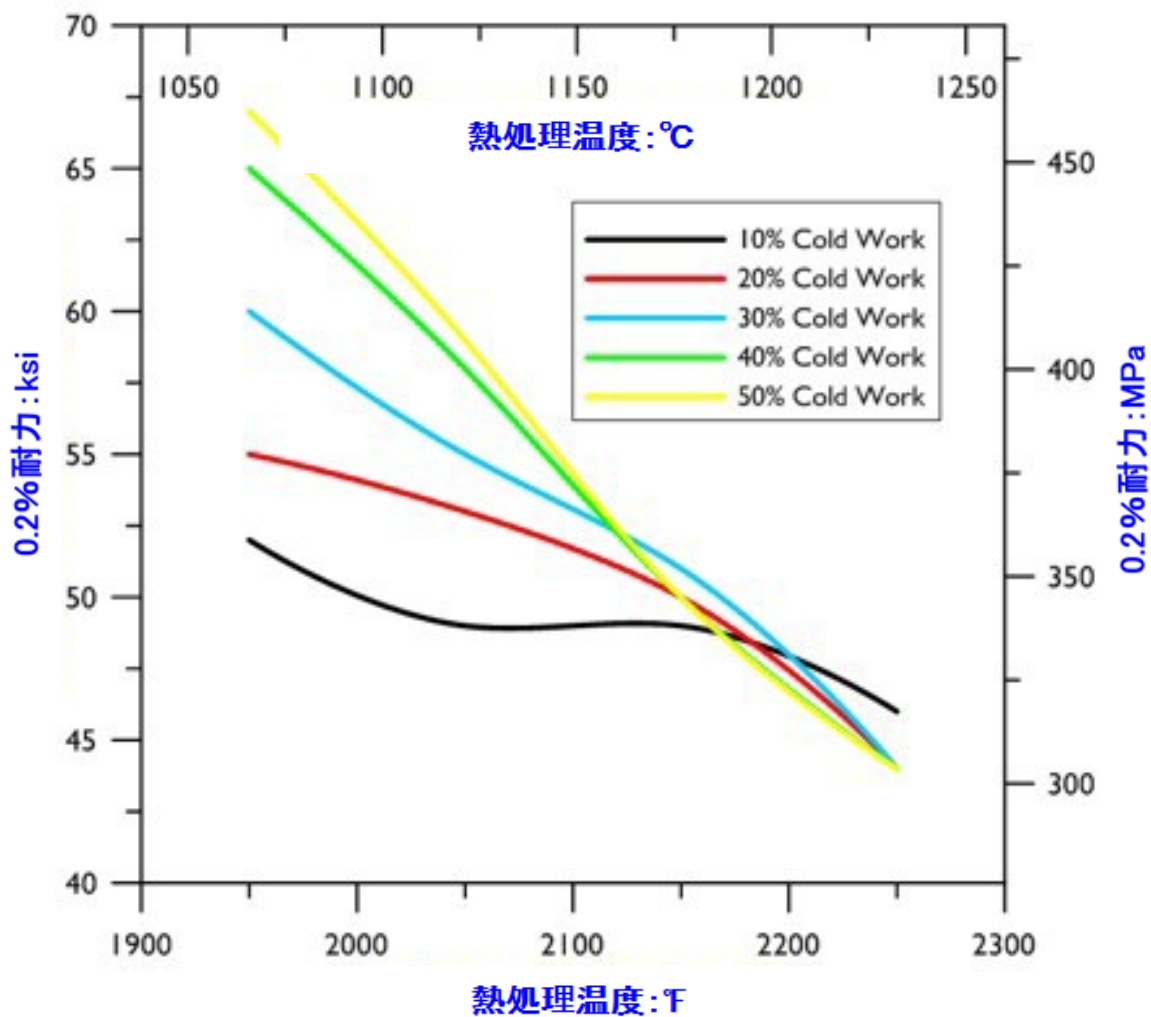
引張り試験結果は、2又はそれ以上の試験の平均

HRB= ロックウェル硬さ "B"スケール

HRC= ロックウェル硬さ "C"スケール

# 熱処理(続き)

冷間加工したHAYNES® HR-120® 薄板に対する  
室温引張り強さ vs. 熱処理温度



# 熱処理(続き)

## HASTELLOY® X 薄板の室温機械的特性に対する冷間加工と熱処理温度の影響

冷間加工率	熱処理* 温度		0.2% 耐力		極限引張り強さ		伸び	硬度
	%	°F	°C	ksi	MPa	ksi		
冷間加工なし	熱処理なし		57	393	114	786	46	89 HRB
10	熱処理なし		96	662	129	889	29	25 HRC
20	熱処理なし		122	841	147	1014	15	31 HRC
30	熱処理なし		142	979	169	1165	10	35 HRC
40	熱処理なし		159	1096	186	1282	8	37 HRC
50	熱処理なし		171	1179	200	1379	7	39 HRC
10	1850	1010	76	524	125	862	32	98 HRB
20	1850	1010	91	627	132	910	27	23 HRC
30	1850	1010	87	600	135	931	28	99 HRB
40	1850	1010	77	531	133	917	32	98 HRB
50	1850	1010	81	558	135	931	33	99 HRB
10	1950	1066	74	510	122	841	34	93 HRB
20	1950	1066	66	455	124	855	35	96 HRB
30	1950	1066	63	434	126	869	36	96 HRB
40	1950	1066	70	483	129	889	35	96 HRB
50	1950	1066	74	510	129	889	34	97 HRB
10	2050	1121	53	365	119	820	42	89 HRB
20	2050	1121	56	386	121	834	40	91 HRB
30	2050	1121	61	421	123	848	39	94 HRB
40	2050	1121	65	448	125	862	37	94 HRB
50	2050	1121	67	462	125	862	38	94 HRB
10	2150	1177	45	310	109	752	49	94 HRB
20	2150	1177	47	324	111	765	47	87 HRB
30	2150	1177	49	338	113	779	46	86 HRB
40	2150	1177	46	317	110	758	48	85 HRB
50	2150	1177	46	317	110	758	48	84 HRB

\*5 分間保持 + 急速空冷

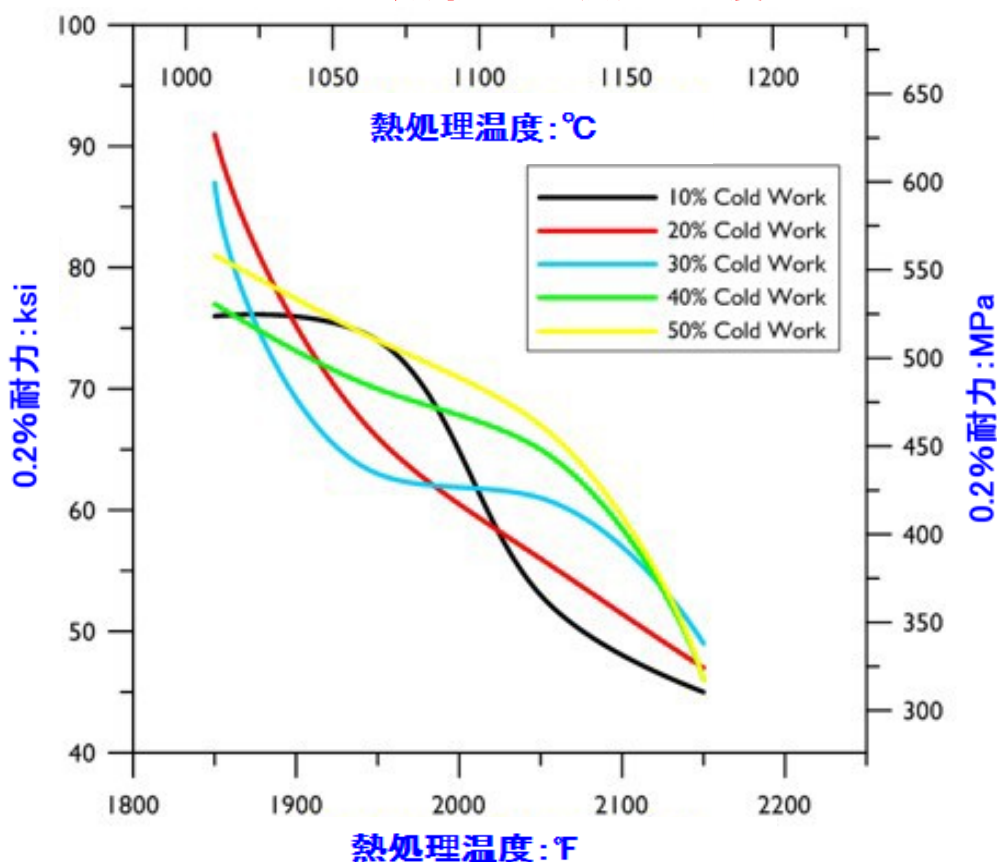
引張り試験結果は、2又はそれ以上の試験の平均

HRB= ロックウェル硬さ "B"スケール

HRC= ロックウェル硬さ "C"スケール

## 熱処理(続き)

冷間加工したHASTELLOY®X 薄板に対する  
室温引張り強さ vs. 熱処理温度



## 時効硬化型合金に対する時効硬化処理

下記の合金に適用できます:

耐食合金  
耐熱合金

合金	処理ステップ数	処理条件
C-22HS®	2	1300° F (704° C)で16時間保持後、1125° F (607° C)まで炉冷、 1125° F (607° C)で32時間保持後、空冷
242®	1	1200° F (649° C)で48 時間*保持後、空冷
244™	2	1400° F (760° C)で16時間保持後、1200° F (649° C)まで炉冷、 1200° F (649° C)で32時間保持後、空冷
263	1	1472°F (800°C)で8時間保持後、空冷
282®	2	1850° F (1010° C)で2時間保持後、急速空冷または空冷、 その後、1450° F (788° C)で8時間保持後、空冷
718	2	325° F (718° C)で8時間保持後、1150° F (621° C)まで炉冷、 1150° F (621° C) で8時間保持後、空冷
R-41	1	1400° F (760° C)で16時間保持後、空冷
WASPALLOY	3	1825° F (996° C)で2時間保持後、空冷、 その後、1550° F (843° C)で4時間保持後、空冷、 その後、1400° F (760° C)で16時間保持後、空冷
X-750	2	1350° F (732° C)で8時間保持後、1150° F (621° C)まで炉冷、 1150° F (621° C)で8時間保持後、空冷

\*最小値

## 熱処理(続き)

時効硬化可能な材料を硬化/強化するために、出発材料が溶体化処理された状態であると仮定して、通常、以下の処理が適用されます。これらの合金のいくつかに対しては、意図する用途および必要な強度レベルにより、代替の硬化/強化処理が可能です。詳細は、Haynes International にお問い合わせください。

### 加熱および冷却速度

下記の合金に適用できます:

耐食合金  
耐熱合金  
耐摩耗・耐食合金

HAYNES® および HASTELLOY® 合金の加熱および冷却は、一般にできるだけ迅速に行う必要があります。これは、中間温度でのマイクロ組織における第2相粒子(とりわけ、耐熱合金の場合には炭化物)の析出を最小にするためです。急速加熱は、また、冷間または熱感加工により蓄えられたエネルギーを保存するため、アニーリング温度での再結晶化および/または結晶粒の成長にとって重要です。実際、加熱が遅い場合は、特に断面が薄い部品において、アニーリング温度における限られた時間しか与えられていなくても、望ましい結晶粒径よりも細くなる可能性があります。

溶体化処理後の急速冷却は、特に、おおよそ1000° F~1800° F(538° C~982° C)の温度範囲で、マイクロ組織の結晶粒界において第2相の析出を防ぐためにも重要です。実用的には、歪みが生じにくい場所では、水冷が好まれます。(時効硬化型の耐熱合金部品の場合は)時効硬化処理からの冷却は、通常、空気冷却によることに留意してください。

冷却速度が遅いことに対する個々の合金の感度は異なりますが、冷却速度が特性に及ぼす影響の例として、HAYNES®188 合金のクリープ寿命を冷却プロセスの関数として次の表に示しています。

HAYNES®188 薄板のクリープ寿命に対する冷却速度の影響

2150° F (1177° C)での溶体化処理後の冷却プロセス	1600° F/7 ksi (871° C/48 MPa) 試験に対する0.5%クリープ時間
水冷	148 h
空冷	97 h
1200° F (649° C)に達するまで炉冷、その後、空冷	48 h

# 熱処理(続き)

## 保持時間

アニーリングに必要な温度での保持時間は、すべての冶金反応が均一にかつ部品全体にわたって完了することを保証するために必要な事柄によって支配されます。先に触れたように、保持時間に対する一般的なルールは断面の厚さに依存しますが、重量のある加工物および部品に対しては厚さ1インチあたり少なくとも30分で、重量がない加工物および部品に対しては(ピース全体が必要なアニール温度で均一になった後) 10~30分です。極端に長い保持時間(一晩中など)は、合金のマイクロ組織および特性を害するおそれがあるため推奨されません。

帯板またはワイヤの連続的なアニーリングの場合、通常は、その温度で数分保持するだけで十分です。

炉内での時間は、炉のタイプと容量、および加工物/部品の厚さと形状に依存します。加工物全体が必要なアニーリング温度に達したかどうかを判断するには、可能であれば、加工物に取り付けられた熱電対を使用して測定を行う必要があります。

## 保護雰囲気の使用

ほとんどの HAYNES® および HASTELLOY® 合金は、酸化環境中でアニールすることができますが、粘着性のある酸化スケールを形成するため、通常は次の工程の前に除去しなければなりません。スケール除去の詳細については、脱スケールと酸洗いのセクションを参照してください。

いくつかの HAYNES® および HASTELLOY® 合金はクロム含量が低く、中性または、わずかに還元雰囲気でのアニーリングが必要です。

ブライト仕上げ(酸化スケールなし)が必要な場合は、低露点水素のような保護雰囲気が必要です。アルゴンおよびヘリウムの雰囲気が使用されていますが、酸素または水蒸気汚染のために、これらの代替ガスでは顕著な着色が起こる可能性があります。窒素または分解アンモニア中でのアニーリングは、通常、推奨されませんが、許容される場合があるかもしれません。

真空アニーリングは一般に許容されますが、真空圧力および温度に依存して、いくらかの着色が起こる場合もあります。強制ガス冷却に使用されるガスの選択は重要です:通常、ヘリウムが好まれ、(一部の合金に対しては)アルゴンと窒素が続いて好まれます。

## 熱処理設備の選択

ほとんどのタイプの工業炉は、HAYNES® および HASTELLOY® 合金の熱処理に適しています。しかしながら、誘導加熱は、温度の制御が不十分で均一な加熱が欠如しているため、通常は推奨されません。トーチ、溶接装置、および類似物による加熱は認められません。熱処理中のあらゆるタイプの火炎の衝突は、避けなければなりません。

# 機械加工

下記の合金に適用できる推奨工具および機械加工パラメータ:

耐食合金

耐熱合金

これらのカテゴリ (25 および 188) のコバルト基合金は、(表に記載しているように) ニッケルおよび鉄基合金とは異なる送りおよび速度を必要とすることに注意してください。

作業	工具タイプ	工具形状 およびセットアップ	速度	送り	切込深さ	潤滑剤
-	-	-	surface ft./ min*	in**	in**	-
難しい障害を伴う粗加工; ターニング または フェーシング	超鋼: C-2 または C-3 グレード	すくい角が負の四角 または三角インサート, 45° SCEA <sup>1</sup> , ノーズ半径: 1/16 in 工具ホルダ 5° 負のバックテーパ, 5° 負の横すくい角	30-50	0.004-0.008 1回転当たり	0.15	無潤滑 <sup>2</sup> 、オイル <sup>3</sup> , または 水性潤滑剤 <sup>4,5</sup>
通常の粗加工; ターニング または フェーシング	上と同じ	上と同じ	90 (80 対コバルト合金) <sup>6</sup>	0.01 1回転当たり	<0.15	無潤滑、オイル、 または 水性潤滑剤
仕上げ; ターニング または フェーシング	上と同じ	すくい角が正の四角 または三角インサート, 可能であれば, 45° SCEA <sup>1</sup> , ノーズ半径: 1/32 in 工具ホルダ: 5° 正のバックテーパ, 5° 正の横すくい角	95-110 (90 対コバルト合金)	0.005-0.007 1回転当たり	0.04	無潤滑または 水性潤滑剤



# 機械加工(続き)

作業	工具タイプ	工具形状 およびセットアップ	速度	送り	切込深さ	潤滑剤
-	-	-	surface ft./min*	in**	in**	-
粗中ぐり	前ページと同じ	インサートタイプの中線り棒の場合は、正の横すくい角の標準工具で、可能な最大の SCEA および ノーズ半径が 1/16 の工具を使用すること。 ロウ付けしたツールバーの場合は、バックテーパを 0° に研磨し、10° の正の横すくい角、ノーズ半径が 1/32 in で、可能な最大の SCEA の工具を使用すること。	70 (60 対コバルト合金)	0.005-0.008 1回転あたり	0.125	無潤滑、 オイル、または 水性潤滑剤
仕上げ中ぐり	上と同じ	インサートタイプのバーに標準の正の横すくい角の工具を取付けて使用すること。仕上げターニングに関してはロウ付けバーを研磨すること。ただし、バックテーパは 0° が最良である。	95-110 (90 対コバルト合金)	0.002-0.004 1回転あたり	0.04	水性潤滑剤
	高速度鋼 M-2, M-7、又は M-40 シリーズ7	半径方向および軸方向すくい角: 0° ~ 10° 正、コーナー角 45°、逃げ角 10° の工具を使用すること。	20-30 (20-25 対コバルト合金)	0.003-0.005 1刃当たり	-	オイルまたは 水性潤滑剤
	超鋼: C-2 グレード (限界性能)	正の軸方向および半径方向すくい角、コーナー角 45°、逃げ角 10° の工具を使用すること。	50-60 (35-40 対コバルト合金)	0.005-0.008 1刃当たり (0.005 1刃当たり 対コバルト合金)	-	オイルまたは 水性潤滑剤
エンドミル	高速度鋼: M-40 シリーズ または T-15	可能であれば、4刃またはそれ以上の刃数の剛性のあるショートエンドミルを使用すること。	20-25 (15-20 対コバルト合金)	1刃当たりの送り: 直径: ¼ 0.002 直径: ½ 0.002 直径: ¾ 0.003 直径: 1 0.004 (対コバルト合金: 直径: ¼ 0.001 直径: ½ 0.0015 直径: ¾ 0.002 直径: 1 0.003)	-	オイルまたは 水性潤滑剤
	超鋼: C-2 グレード	4またはそれ以上の刃数で、可能であれば可変リードのシャープコーナエンドミルを使用すること。	50-60 (40-50 対コバルト合金)	上と同じ	-	オイルまたは 水性潤滑剤

# 機械加工(続き)

作業	工具タイプ	工具形状 およびセットアップ	速度	送り	切込深さ	潤滑剤
-	-	-	surface ft./min*	in**	in**	-
穴あけ	高速度鋼: M-33、M-40 シリーズ、または T-15	先端角が135°で ウェブが厚く、短いドリルを使用すること; ウェブ先端をシンニングすることでスラストを低減でき、先端の制御を助ける。	10-15 (7-10 対コバルト合金) 直径が $\frac{1}{4}$ in またはそれ以下のドリルに対しては 200 rpm が最大。	送り/回転: 直径: $\frac{1}{8}$ 0.001 直径: $\frac{1}{4}$ 0.002 直径: $\frac{1}{2}$ 0.003 直径: $\frac{3}{4}$ 0.005 直径: 1 0.007 (対コバルト合金も同じ))	-	オイルまたは水性潤滑剤 可能であれば、冷却剤供給ドリルを使用すること。
	超鋼: C-2 グレード	推奨はできないが、深さが大きくなければ、尖ったドリルにより厳密にセットアップができるかも知れない。スラストを減らすにはウェブをシンニングすること: 刃先角は135°にすること。 ガンドリルを使用することができる。	50 (40 対コバルト合金)	上と同じ	-	オイルまたは水性冷却剤供給式の尖った超鋼ドリルが、経済的なセットアップである場合がある。
リーマ	高速度鋼: M-33、M-40 シリーズ、または T-15	コーナ角 45°、ランド幅が狭く、逃げ角10°のリーマを使用すること。	10-15 (8 対コバルト合金)	送り/回転: 直径: $\frac{1}{2}$ 0.003 直径: 2 0.008 (対コバルト合金も同じ)	-	オイルまたは水性潤滑剤
	超鋼: C-2 または C-3 グレード	尖ったリーマを推奨する; ソリッドリーマは非常に良好なセットアップが必要になる。工具の形状は上と同じ。	40 (20 対コバルト合金)	上と同じ	-	オイルまたは水性潤滑剤

## 機械加工(続き)

作業	工具タイプ	工具形状 およびセットアップ	速度	送り	切込深さ	潤滑剤
-	-	-	surface ft./min*	in**	in**	-
タップ	高速度鋼: M-1、M-7、 または M-10	2刃で、フック角が 0° ~ 10° のスパイラルプラグ タップを使用すること。 表面の窒化は耐摩耗性を 高めるが、欠け、あるいは 折損を起こすかも知れない。 可能であれば、工具寿命 を延ばすために、ねじの 60-65% にタップを立てること。	7 (対コバルト 合金も同じ)	-	-	できるだけ最良 のタップコンパウ ンドを使用すること; スルホン酸塩 化物油を基材と するものを推奨 する。
	超鋼: 推奨しない	-	-	-	-	-
放電加工	HAYNES® および HASTELLOY® 合金は、従来の放電加工機(EDM)、あるいはワイヤカット放電加工機により、容易に切断することができる。					

**一般的な注意事項:** 可能であれば、高圧冷却剤供給システムおよび工具を通す冷却剤供給システムを使用してください。

\* surface m/min への換算は、0.305 を乗ずる。

\*\* in から mm への換算は、25.4 を乗ずる。

<sup>1</sup>SCEA = 工具の横キ切れ刃角、またはリード角。

<sup>2</sup>無潤滑切削が推奨されている場合は、エアジェットを工具に直接あてることで、工具寿命を大幅に延ばすことができます。

<sup>3</sup>油冷却剤には、極圧添加剤を含んだ最高品質のスルホン酸塩化物油を使用しなければなりません;

100° F (38° C)における粘度は、50 ~ 125 SSU が標準です。

<sup>4</sup>水性冷却剤は、水と極圧添加剤を含む、最高品質の水溶性スルホン酸塩化物油またはケミカルエマルジョンのいずれかを 15:1 の割合で混合したものでなければなりません。

<sup>5</sup>水性冷却剤は、切削を中断した場合、超硬工具の欠けや急速な損傷を起こすことがあります。

<sup>6</sup>セットアップの厳密度に依存します。

<sup>7</sup>M-40 シリーズの高速度鋼には、本書記載時には M-41 ~ M-46 が含まれます; その他も順次追加されると思いますが、同様に適しているはずです。

## 機械加工(続き)

下記の合金に適用できます:

耐摩耗・耐食合金

ULTIMET® 合金は、適切な工具およびパラメータが使用されれば、成功裏にターニング加工、穴あけ、およびミーリング加工することができます。しかしながら、この合金は高い強度を有し、急速に加工硬化します。ULTIMET® 合金特有の加工ガイドラインは次のとおりです:

### ターニング (ULTIMET® 合金)

超鋼(高速度鋼ではない) 工具が推奨されます。

表面速度: 60–70 surface ft./min (0.30–0.35 m/s).

送り速度: 0.005–0.010 in (0.13–0.25 mm).

粗加工時の切込深さ: 0.05–0.10 in (1.3–2.5 mm).

仕上げ加工時の切込深さ: 0.010–0.015 in (0.25–0.38 mm).

### 穴あけ (ULTIMET® 合金)

超鋼刃付けまたは高速度鋼ドリルが推奨されます。

表面速度: 30–35 surface ft./min (0.15–0.18 m/s) 対超鋼刃付けドリル

: 8–10 surface ft./min (0.04–0.05 m/s) 対高速度鋼ドリル

送り速度: 0.004 in (0.1 mm) /回転 直径 0.25 in (6.4 mm) およびそれ以上に対し

刃先角度: 135°

### ミーリング (ULTIMET® 合金)

超鋼(高速度鋼ではない) エンドミルが推奨されます。

表面速度: 25–30 surface ft./min (0.13–0.15 m/s)

1刃当たりの送り: 0.002 in (0.05 mm) 0.75 in (19 mm) 以下の Cutter 直径に対し  
: 0.003 in (0.08 mm) 0.75 in (19 mm) を超える Cutter 直径に対し

# 研削

下記の合金に適用できる推奨ホイールおよび冷却剤:

耐食合金  
耐熱合金

研削のタイプ	ホイール*	製造メーカ	作業のタイプ	冷却剤
<b>円筒研削</b>				
ストレートまたは テーパ外径	53A80-J8V127	Norton	尖った角および 精密仕上げ	重負荷用可溶性冷却剤 25:1 の比で CASTROL 653 と混合
成形加工、 シングルホイール セクション法	38A60-J8-VBE	Norton	突起部の除去、 尖った角、水平・垂 直の丸底加工	乾式
成形加工、 クラッシュロール法	53A220-L9VB	Norton	精密成形、 丸底加工	ストレートオイル
芯なし	53A80-J8VCN	Norton	薄肉材、中実または 厚肉材の加工	重負荷用可溶性冷却剤 25:1 の比で CASTROL 653 と混合
<b>内面研削</b>				
ストレートまたはテーパ	23A54-L8VBE	Norton	小、中、大径の穴およ び小径の座ぐり加工	重負荷用可溶性冷却剤 25:1 の比で >CASTROL 709 と混合
<b>平面研削</b>				
ストレートホイール	32A46-H8VBE 38A46-I-V	Norton	-	重負荷用可溶性冷却剤 25:1 の比で CASTROL 653 と混合
両面ディスクタイプ	87A46-G12-BV 87A46-J11-BW	Gardner	通し送り研削、 回転テーブル研削、 細かい加工	重負荷用可溶性冷却剤 10:1 の比で CASTROL 653 と混合
円筒または分割タイプ	32A46-F12VBE	Norton	細かい加工、傾斜面お よび公差が狭い加工	炭酸ソーダ水 CASTROL 653
シングルホイール セクション法	32A46-F12VBEP	Norton	輪郭加工	乾式
<b>ねじ研削</b>				
ねじ外面	A100-T9BH	Norton	-	VANTOL 5299-M または 同等剤
<b>ホーニング</b>				
内面	C120-E12-V32 C220-K4VE J45-J57	Bay State Carborundum Sunnen	-	VANTOL 5299-C または 同等剤
<b>粗研削</b>				
切断(湿式)	86A461-LB25W	Norton	-	CASTROL 653
切断(乾式)	4NZA24-TB65N	Norton	-	乾式
Snagging	4ZF1634-Q5B38	Norton	-	乾式

\*ここに示したホイールは、6000 ~ 6500 surface ft./min の速度に対して最適化されています。

# 脱スケールおよび酸洗い

下記の合金に適用できます:

耐食合金  
耐熱合金  
耐摩耗・耐食合金

HAYNES® および HASTELLOY® 合金は、本質的に耐食性を有しているため、一般に、冷たい酸性の酸洗い溶液に対しては不活性です。また、熱処理中にこれらの合金上に形成される酸化膜は、ステンレス鋼上に形成される酸化膜よりも高い粘着性があります。

HAYNES® および HASTELLOY® 合金に対する最も効果的な脱スケールの方法は、合金は溶融した苛性浴に浸し、その後高温で酸洗いすることです。

HAYNES® および HASTELLOY® 合金に対しては、以下の3つの脱スケール方法が成功裏に使われてきました。すなわち:

1. VIRGO 脱スケール塩浴プロセス
2. 水酸化ナトリウム還元塩浴プロセス
3. DGS 酸化塩浴プロセス

これらの方法に関連する手順を、下記の表に示します。

## 脱スケールおよび酸洗いの手順

	VIRGO 脱スケール塩浴	水酸化ナトリウム還元塩浴	DGS 酸化塩浴
脱スケール剤	VIRGO 塩浴剤	水酸化ナトリウム	DGS 塩浴剤
浴温	970°F (521°C)	750°F-800°F (427°C-427°C)	850°F-950°F (454°C-510°C)
脱スケール時間	1 ~ 3 分	15 分	2 ~ 10 分
水洗浄時間	1 ~ 2 分	1 ~ 2 分	1 ~ 5 分
酸洗いステップ 1	15-17% 硫酸 + 0.5-1% 塩酸 165°F (74°C) で3分*	4-6% 過マンガン酸カリウム + 1-2% 水酸化ナトリウム 135°F-155°F (57°C-68°C) で15分*	15-25% 硝酸 + 3-5% フッ化水素酸 130°F-150°F (54°C-66°C) で 10 ~ 20 分
酸洗いステップ 2	7-8%硝酸 +3-4% フッ化水素酸 125°F-160°F (52°C-71°C) で 25 分	8-12% 硝酸 + 2-3% フッ化水素酸 125°F-160°F (52°C-71°C) で 15 分	第2ステップなし
仕上げ水洗浄	3 分又は蒸気噴霧	浸漬	浸漬および蒸気噴霧

\*その後に水洗浄

## 脱スケールおよび酸洗い(続き)

特定の条件下では、砂、ショット、または蒸気ブラストをスケール除去に使用できます。ブラスト材料は、表面をかじるのではなく、迅速な切削作用を提供するようなものでなければなりません。また、特に鉄で汚染されている場合は、砂を再使用しないでください。ブラスト処理後、酸で加工物を酸洗いで、埋め込まれた鉄または他の不純物を除去することが望ましいです。

歪みの危険性および/または砂やスケールを金属表面に埋め込む危険性があるため、断面が薄い部品をブラストするときは細心の注意が必要です。サンドブラストはまた、表面を硬化させる傾向があり、ある種の合金ではその後の成形上の問題を引き起こす可能性があります。

### 免責事項:

Haynes International, Inc. は、本パンフレットに記載されているデータの精度・正確性を保証するために妥当な努力を払っておりますが、データの精度、正確性、あるいは信頼性について、いかなる表明も保証もいたしません。すべてのデータは、一般的な情報のみであり、設計上のアドバイスを提供するものではありません。ここに開示されている合金特性は、主に Haynes International, Inc. によって行われた作業に基づいており、場合によっては公開文献の情報によって補足されているため、そのような試験の結果のみを示すものであり、保証最大値または最小値と考えるはなりません。実際の使用条件で特定の合金を試験して特定の目的に対する適合性を判断するのはユーザーの責任です。

特定の製品に含まれる特定の元素濃度とその潜在的な健康への影響については、Haynes International, Inc. が提供する安全データシートを参照してください。特記のない限り、すべての商標はHaynes International, Inc. が所有しています。